



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos.*



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Metodología para la evaluación de la operatividad en el aeropuerto de Majuro (Islas Marshall) por inundación costera.

Trabajo realizado por:

Ana Carolina Perrone Calvo

Dirigido:

Fernando J. Méndez Incera

Alba Ricondo Cueva

Titulación:

**Máster Universitario en Costas
y Puertos**

Santander, septiembre de 2020.

TRABAJO FINAL DE MASTER

Metodología para la evaluación de la operatividad en el aeropuerto de Majuro (Islas Marshall) por inundación costera.

Autora: Ana Carolina Perrone Calvo

Directores: Fernando J. Méndez Incera y Alba Ricondo Cueva.

Convocatoria: septiembre 2020

RESUMEN

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología para la evaluación de la operatividad en el Aeropuerto Internacional Amata Kabua, en el atolón de Majuro, Islas Marshall; motivado por los eventos de inundación por oleaje que han obligado a su cierre eventual en varias ocasiones.

Tomando como base para el desarrollo de la metodología: un punto cercano a costa, correspondiente a la base de datos del *hindcast híbrido de oleaje espectral para el atolón de Majuro* [Ricondo et al. 2019], un mareógrafo situado en la laguna interior del atolón, una base de datos de viento en las proximidades de la zona de estudio y, por último, información topo-batimétrica en formato Modelo Digital del Terreno (MDT) del atolón de Majuro.

La metodología propuesta en este proyecto se centra en el desarrollo de dos fases fundamentales: (1) Pre – procesamiento de datos y (2) el desarrollo del *hindcast* híbrido de propagación del oleaje.

La primera fase, *pre-procesado de datos*, engloba una serie de tareas entre las cuales se encuentran: realizar un análisis del clima marítimo y otro de la información topo-batimétrica disponible, para poder realizar más adelante una selección de perfiles representativos de la zona de estudio (Perfiles 14, 1 y 2).

La segunda fase, *desarrollo del hindcast híbrido de propagación del oleaje*, incluye la propagación de los datos del *hindcast* de oleaje hasta la línea de costa, la selección de 100 estados de mar representativos mediante el algoritmo MDA, la propagación de los 100 casos de oleaje para 6 niveles de mar (-1.5, -0.5, 0, 0.5, 1.5, 1.7, 2 m) sobre cada perfil, mediante el uso del modelo hidrodinámico SWASH 1D y, finalmente, la reconstrucción histórica de la serie de los parámetros de oleaje, viento, run-up (Ru2%) y rebase como output del metamodelo híbrido. Denominado como tal por emplear tanto el modelo numérico SWASH como herramientas estadísticas de clasificación (MDA) y funciones de interpolación de base radial (RBF).

La última etapa del proyecto consiste en determinar la operatividad. Para ello, se ha empleado un listado de eventos históricos de inundación recopilados por [Ford et al., 2018], los cuales han sido determinantes a la hora de establecer el umbral de operatividad (55 l/s/m). Los resultados finales indican que, en el Aeropuerto de Majuro, los eventos de inundación tienen lugar generalmente en los perfiles cuyas plataformas coralinas son más estrechas (<130 m) y que el aeropuerto se encuentra fuera de servicio alrededor de 144 h/año, lo que supone un total de 6 días de inoperatividad anual.

Por otro lado, también se incluye un análisis de sensibilidad del modelo hidrodinámico de propagación de oleaje (SWASH 1D), en el cual se estudian los procesos de propagación y las respuestas de caudal instantáneo de rebase y nivel de run-up (Ru2%) para cada perfil seleccionado, para distintas condiciones de oleaje. Los resultados del análisis indican que, al

aumentar el nivel del mar en las simulaciones, la rotura del oleaje se produce de manera más progresiva, también se observa una disminución del coeficiente de reflexión en el perfil y un aumento significativo del $Ru2\%$ y de la tasa instantánea de rebase; Al aumentar la velocidad del viento, se produce un aumento de altura de ola de 10 cm y un aumento de $Ru2\%$ en la misma medida; Al aumentar la altura de ola significativa, se produce un aumento de la energía del oleaje entre un 30 % y un 50 % en función del tipo de perfil analizado y un aumento del run-up en torno a 0.80 m. Además, la rotura del oleaje se produce unos metros antes (50 m aprox.) sobre el perfil que aquellas olas con menor altura y la disipación de energía durante el proceso de rotura varía significativamente en función de la batimetría. También se ha comprobado que el perfil se vuelve cada vez menos reflejante para perfiles con plataforma coralina de más de 200 m de anchura; Por último, al aumentar el periodo pico, se produce un aumento significativo de la altura de ola y, por tanto, de la energía del oleaje. Además de una subida del nivel de run-up de aproximadamente +50 cm, al aumentar 10 s el periodo.

Por último, se estudia la operatividad suponiendo una subida del nivel del mar (NMM), para las hipótesis de $NMM + 0.10$ m, $NMM + 0.20$ m y $NMM + 0.50$ m. Los resultados de este último análisis han sido que, el perfil 14, al ser el de menor ancho de plataforma, es el más vulnerable ante el aumento del nivel del mar. Por lo tanto, la situación pésima sería para el perfil 14, donde: con una subida de 10 cm, las horas de inoperatividad anuales ascienden a 225.6 h, lo que suponen aproximadamente 9.4 días; con una subida de 20 cm, las horas de inoperatividad anuales ascienden a 355.8 h, lo que suponen aproximadamente 15 días; Y, por último, con una subida de 50 cm, las horas de inoperatividad anuales ascienden a 1126.3 h, lo que suponen aproximadamente 47 días.

Methodology for the assessment of the operability at Majuro's airport (Marshall Islands) due to coastal flooding.

Author: Ana Carolina Perrone Calvo

Directors: Fernando J. Méndez Incera and Alba Ricondo Cueva.

Call: september 2020

ABSTRACT

In the present work a methodology has been developed for the evaluation of the operability in the International Airport Amata Kabua, in Majuro Atoll, Marshall Islands; motivated by the events of flooding for waves that have forced to their eventual closing in several occasions.

The methodology was developed based on: a near-shore point, corresponding to the *hybrid spectral wave hindcast database for Majuro Atoll* [Ricondo et al. 2019], a tide gauge located in the atoll's interior lagoon, a wind database in the vicinity of the study area and, finally, topographic information in Digital Terrain Model (DTM) format for Majuro Atoll.

The methodology proposed in this project focuses on the development of two fundamental phases: (1) Pre-processing of data and (2) development of the hybrid hindcast for wave propagation.

The first phase, *pre-processing of data*, encompasses a series of tasks among which are: an analysis of the maritime climate and another of the available topographic-bathymetric information, in order to later carry out a selection of representative profiles of the study area (Profiles 14, 1 and 2).

The second phase, *development of the hybrid wave propagation hindcast*, includes the propagation of the wave hindcast data to the coastline, the selection of 100 representative sea states by means of the MDA algorithm, the propagation of the 100 wave cases for 6 sea levels (-1.5, -0.5, 0, 0.5, 1.5, 1.7, 2 m) on each profile, using the hydrodynamic model SWASH 1D and, finally, the historical reconstruction of the series of wave, wind, run-up (Ru2%) and overtopping parameters as output of the hybrid metamodel. Called as such because it uses both the numerical SWASH model and statistical classification tools (MDA) and radial-based interpolation (RBF) functions.

The last stage of the project is to determine the operability. For this purpose, a list of historical flood events compiled by [Ford et al., 2018] has been used, which have been decisive in establishing the threshold of operability (55 l/s/m). The final results indicate that, in Majuro Airport, flooding events generally occur in the profiles with narrower coral platforms (<130 m) and that the airport is out of service for about 144 h/year, which means a total of 6 days of inoperability per year.

On the other hand, it also includes a sensitivity analysis of the hydrodynamic model of wave propagation (SWASH 1D), which studies the processes of propagation and the responses of instantaneous flow of overflow and run-up level (Ru2%) for each profile selected, for different wave conditions. The results of the analysis indicate that, as the sea level rises in the simulations, wave breakage occurs more progressively, there is also a decrease in the profile reflection

coefficient and a significant increase in $Ru2\%$ and the instantaneous overflow rate; As the wind speed increases, there is an increase in wave height of 10 cm and an increase of $Ru2\%$ in the same measure; As the wave height increases significantly, there is an increase in wave energy between 30% and 50% depending on the type of profile analyzed and an increase in the run-up around 0.80 m. In addition, wave breakage occurs a few meters earlier (50 m approx.) on the profile than those waves with lower height and energy dissipation during the process of breakage varies significantly depending on bathymetry. It has also been found that the profile becomes less and less reflective for profiles with a coral platform over 200 m wide. Finally, as the peak period increases, there is a significant increase in wave height and therefore wave energy. In addition to a rise in the run-up level of approximately +50 cm, as the period increases by 10 s.

Finally, the operation is studied assuming a rise in sea level (MSL), for the hypothesis of MSL + 0.10 m, MSL + 0.20 m and MSL + 0.50 m. The results of this last analysis have been that profile 14, being the one with the smallest platform width, is the most vulnerable to sea level rise. Therefore, the worst situation would be for profile 14, where: with a rise of 10 cm, the annual hours of inoperability rise to 225.6 h, which means approximately 9.4 days; with a rise of 20 cm, the annual hours of inoperability rise to 355.8 h, which means approximately 15 days; and, finally, with a rise of 50 cm, the annual hours of inoperability rise to 1126.3 h, which means approximately 47 days.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MOTIVACIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	2
1. LOCALIZACIÓN	2
2. DINÁMICAS MARINAS.....	3
DATOS DE PARTIDA.....	4
1. CLIMA MARÍTIMO Y ATMOSFÉRICO	4
1.1 Oleaje	4
1.2 Nivel del mar.....	6
1.3 Viento.....	6
2. INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA	7
MODELO HIDRODINÁMICO SWASH.....	8
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO SWASH.....	9
1. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	9
2. RESULTADOS	11
2.1 Descripción.....	11
2.2 Comentarios.....	15
3. CONCLUSIONES	24
METODOLOGÍA.....	25
1. ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO.	25
2. ESTUDIO DE LA INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA DISPONIBLE Y SELECCIÓN DE LOS PERFILES REPRESENTATIVOS DE LA ZONA DE ESTUDIO.	26
3. PROPAGACIÓN DEL OLEAJE A PROFUNDIDADES REDUCIDAS.	30
4. SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE OLEAJES REPRESENTATIVOS (MDA).....	33
5. APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO SWASH	35
5.1 Inputs.....	35
5.2 Condiciones de contorno	36
5.3 Outputs.....	37
6. RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DEL HINDCAST (RBF)	37
DETERMINACIÓN DE LA OPERATIVIDAD EN EL AEROPUERTO DE MAJURO.....	41
ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD FRENTE A DISTINTOS ESCENARIOS DE AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR	47
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	49
CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS.....	51

Índice de figuras

FIGURA 1. ATOLÓN DE MAJURO. PRINCIPALES REGIONES Y UBICACIÓN DEL AEROPUERTO. [FUENTE: ARTÍCULO “HOW THE U.S. BETRAYED THE MARSHALL ISLANDS, KINDLING THE NEXT NUCLEAR DISASTER”, PERIÓDICO LOS ÁNGELES TIMES].....	1
FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DEL ATOLÓN DE MAJURO, CAPITAL DE LAS ISLAS MARSHALL, OCEANÍA. [FUENTE: GOOGLE MAPS]	2
FIGURA 3. ATOLÓN DE MAJURO [FUENTE: FORD ET AL., 2018].	3
FIGURA 4. BASE DE DATOS CAWCR WAVE HINDCAST 1979-2019 – RESULTADO DE PARÁMETROS DEL OLEAJE ESPECTRAL EN 3683 PUNTOS ENTRE EL PACÍFICO OCCIDENTAL Y AUSTRALIA.	4
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL PUNTO DE HINDCAST DE OLEAJE.	4
FIGURA 6. REGISTRO HISTÓRICO DE LA BASE DE DATOS HINDCAST CAWCR WAVE HINDCAST 1979-2019, DE LOS PARÁMETROS DE OLEAJE H_s , T_p Y θ	5
FIGURA 7. REGISTRO HISTÓRICO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR, REGISTRADO POR EL MAREÓGRAFO 1838 DEL ATOLÓN DE MAJURO.	6
FIGURA 8. ROSA DE VIENTO - MUESTRA LA VELOCIDAD DEL VIENTO SEGÚN LOS COLORES INDICADOS EN LA LEYENDA, LA FRECUENCIA CON LA QUE SE DAN LOS VALORES Y LA DIRECCIÓN CON LA QUE INCIDE EL VIENTO.	7
FIGURA 9. MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT). INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA REFERENTE AL ATOLÓN DE MAJURO.	8
FIGURA 10. ESQUEMA INDICATIVO DE LAS CONDICIONES DE OLEAJE ANALIZADAS EN CADA PRUEBA, PARA CADA NIVEL DE MAR Y PARA CADA PERFIL.	10
FIGURA 11. PERFIL TOPO-BATIMÉTRICO 14.	11
FIGURA 12. PERFIL TOPO-BATIMÉTRICO 1.	11
FIGURA 13. PERFIL TOPO-BATIMÉTRICO 2.	11
FIGURA 14. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA ALTURA DE OLA INDIVIDUAL SIGUIENDO LA EXPRESIÓN DE RAYLEIGH. [FUENTE: WAVES IN OCEANIC AND COASTAL WATERS. LEO H. HOLTHTUIJSEN]	12
FIGURA 15. EJEMPLO DE RESULTADOS OBTENIDOS TIPO 1.	14
FIGURA 16. EJEMPLO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS TIPO 2.	15
FIGURA 17. EJEMPLO DEL COMPORTAMIENTO DEL PERFIL 1 FRENTE A NIVEL DEL MAR (1) -1.5 Y 0 M (2).	16
FIGURA 18. EJEMPLO DEL PERFIL 1 EN CUANTO A LA VARIACIÓN DEL VIENTO: (1) 0 M/S, (2) 10 M/S Y (3) 20 M/S.	17
FIGURA 19. ANÁLISIS COMPARATIVO - RESULTADOS DE LAS SERIES DE NIVEL DEL MAR, RUN-UP ($Ru2\%$) Y REBASE, PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2, SOMETIDOS A LAS MISMAS CONDICIONES DE OLEAJE, EXCEPTUANDO EL PARÁMETRO (1) $H_s = 1$ M VS (2) $H_s = 1.5$ M.	19
FIGURA 20. ANÁLISIS COMPARATIVO - RESULTADOS DE LAS SERIES DE NIVEL DEL MAR, RUN-UP ($Ru2\%$) Y REBASE, PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2, SOMETIDOS A LAS MISMAS CONDICIONES DE OLEAJE, EXCEPTUANDO EL PARÁMETRO (1) $H_s = 1$ M VS (2) $H_s = 1.5$ M.	20
FIGURA 21. ANÁLISIS COMPARATIVO – RESULTADOS DE LAS SERIES DE NIVEL DEL MAR, RUN-UP ($Ru2\%$) Y REBASE, PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2, SOMETIDOS A LAS MISMAS CONDICIONES DE OLEAJE, EXCEPTUANDO EL PARÁMETRO (1) $T_p = 10$ S VS (2) $T_p = 15$ S VS (3) $T_p = 20$ S.	22
FIGURA 22. ANÁLISIS COMPARATIVO – RESULTADOS DE LAS SERIES DE NIVEL DEL MAR, RUN-UP ($Ru2\%$) Y REBASE, PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2, SOMETIDOS A LAS MISMAS CONDICIONES DE OLEAJE, EXCEPTUANDO EL PARÁMETRO (1) $T_p = 10$ S VS (3) $T_p = 20$ S.	23
FIGURA 23. ESQUEMA QUE MUESTRA LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DETERMINAR LA OPERATIVIDAD EN EL AEROPUERTO DE MAJURO.	25
FIGURA 24. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS DE OLEAJE.	26
FIGURA 25. UBICACIÓN DE LOS 17 PERFILES SELECCIONADOS PARA CARACTERIZAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS MISMOS ANTE CONDICIONES CLIMÁTICAS ADVERSAS EN LA ZONA DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL AMATA KABUA.	27
FIGURA 26. EJEMPLO DE LA EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN TOPO-BATIMÉTRICA DE LA BASE DE DATOS CON FICHeros TIPO RÁSTER, CORRESPONDIENTE AL PERFIL 1 (P1).	27
FIGURA 27. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PERFILES TOPO-BATIMÉTRICOS (PERFILES 1-17) OBTENIDOS A LO LARGO DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL AMATA KABUA, ATOLÓN DE MAJURO.	28
FIGURA 28. (GRÁFICO SUPERIOR) REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PERFILES TOPO-BATIMÉTRICOS QUE CONSTITUYEN LA ZONA DE ESTUDIO (PERFILES 1-17). (GRÁFICO INFERIOR) SE SEÑALAN EN AMARILLO AQUELLOS CONSIDERADOS COMO	

REPRESENTATIVOS PARA EL ESTUDIO DE LA OPERATIVIDAD EN EL AEROPUERTO INTERNACIONAL AMATA KABUA, ATOLÓN DE MAJURO.....	29
FIGURA 29. ESQUEMA GRÁFICO DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN QUE SUFRE EL OLEAJE DURANTE LA PROPAGACIÓN HACIA LA LÍNEA DE COSTA. [FUENTE: UNIVERSITY OF HAWÁI.].....	30
FIGURA 30. ORIENTACIÓN DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE AMATA KABUA RESPECTO AL NORTE.	32
FIGURA 31. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS ALTURAS DE OLA INICIALES.....	33
FIGURA 32. EJEMPLO DE SELECCIÓN DE ESTADOS DE MAR REPRESENTATIVOS EMPLEANDO EL ALGORITMO DE MÁXIMA DISIMILITUD (MDA). [FUENTE: CAMUS ET AL. 2011].....	34
FIGURA 33. SELECCIÓN DE LOS 100 CASOS REPRESENTATIVOS DE OLEAJE A PROPAGAR TRAS LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO MDA. EN AMARILLO SE PRESENTA LA BASE DE DATOS COMPLETA, MIENTRAS QUE LOS PUNTOS NEGROS REPRESENTAN LOS CASOS SELECCIONADOS.....	35
FIGURA 34. PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADO Y VIENTO PARA LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LAS SERIES DE OLEAJE, VIENTO, RUN-UP (Ru2%) Y REBASE, PARA EL PERFIL 14.....	38
FIGURA 35. PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADO Y VIENTO PARA LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LAS SERIES DE OLEAJE, VIENTO, RUN-UP (Ru2%) Y REBASE, OBTENIDOS PARA CADA PERFIL 1.	38
FIGURA 36. PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADO Y VIENTO PARA LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LAS SERIES DE OLEAJE, VIENTO, RUN-UP (Ru2%) Y REBASE, OBTENIDOS PARA CADA PERFIL 2.	39
FIGURA 37. SERIE HISTÓRICA DE Ru2% RECONSTRUIDA, DESDE 1993 HASTA 2019.....	39
FIGURA 38. SERIE HISTÓRICA DE LA TASA INSTANTÁNEA DE REBASE RECONSTRUIDA, DESDE 1993 HASTA 2019.	40
FIGURA 39. IMÁGENES DE LOS DAÑOS SUFRIDOS EN EL SUR DE LA ISLA COMO CONSECUENCIA DEL EVENTO DE INUNDACIÓN QUE TUVO LUGAR EL DÍA 26/06/2013: (A) AGUA ESTANCADA Y UNA MEZCLA DE RESIDUOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS ENCONTRADOS EN EL SUR DEL ATOLÓN; (B) ARENA, GRAVAS Y ARRECIFES DE CORAL MUERTOS, HALLADOS EN LA ZONA SUR DEL ATOLÓN; (C-D) DAÑOS SOBRE LAS PROTECCIONES COSTERAS E IMÁGENES DE LA INUNDACIÓN, EN LA ZONA DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE MAJURO. [FUENTE: FORD ET AL., 2018].....	42
FIGURA 40. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS EVENTOS DE REBASE QUE TUVIERON LUGAR EN LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS REGISTRADAS PARA LOS DÍAS 08/06/1994, 24/06/2013 Y 08/10/2014, EN EL PERFIL 14.....	43
FIGURA 41. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS EVENTOS DE REBASE QUE TUVIERON LUGAR EN LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS REGISTRADAS PARA LOS DÍAS 08/06/1994, 24/06/2013 Y 08/10/2014, EN EL PERFIL 23.....	44
FIGURA 42. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS EVENTOS DE REBASE QUE TUVIERON LUGAR EN LAS INUNDACIONES HISTÓRICAS REGISTRADAS PARA LOS DÍAS 08/06/1994, 24/06/2013 Y 08/10/2014, EN EL PERFIL 1.	44
FIGURA 43. ÁREAS DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL AMATA KABUA SUSCEPTIBLES A SUFRIR EVENTOS DE INUNDACIÓN SIMILARES A LOS OBTENIDOS PARA EL PERFIL 14.....	45
FIGURA 44. UMBRAL DE OPERATIVIDAD PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2.....	46
FIGURA 45. ESCENARIO 1. AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR 0.10 M.....	48
FIGURA 46. ESCENARIO 2. AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR 0.20 M.....	48
FIGURA 47. ESCENARIO 3. AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR 0.50 M.....	49

Índice de tablas

TABLA 1. RECOPIACIÓN DE EVENTOS HISTÓRICOS DE INUNDACIÓN QUE DIERON PASO AL CIERRE TEMPORAL DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE MAJURO. [FUENTE: FORD ET AL., 2018]	41
TABLA 2. RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA DE LA SERIE DE CAUDALES DE REBASE EN LOS PERFILES 1, 1 Y 2.....	43
TABLA 3. RESULTADOS DEL NÚMERO DE HORAS NO OPERATIVAS AL AÑO PARA LOS PERFILES 14, 1 Y 2 OBTENIDAS TRAS EL ESTUDIO DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS HIPOTÉTICOS DE SUBIDA DE NIVEL MEDIO DEL MAR.....	47

INTRODUCCIÓN

1. Motivación

Majuro es uno de los 64 atolones que conforman el país de la República de las Islas Marshall. No llega a los 10 kilómetros cuadrados de extensión, pero se encuentra rodeado de cientos y cientos de kilómetros de agua que le pertenecen. Reúne a más de la mitad de la población total del país y cuenta con un aeropuerto internacional propio, el Aeropuerto Internacional Islas Marshall, también conocido como Aeropuerto Internacional de Amata Kabua, situado en las proximidades de las principales regiones (Figura 1).



Figura 1. Atolón de Majuro. Principales regiones y ubicación del aeropuerto. [Fuente: artículo "How the U.S. betrayed the Marshall Islands, kindling the next nuclear disaster", periódico *Los Angeles Times*]

Una de las características principales de estos atolones es la baja altitud que presentan, con la mayor parte del terreno por debajo de los 3 m sobre el nivel medio del mar [Ford et al., 2018]. Majuro se encuentra prácticamente a nivel del mar y es por este motivo que presenta una alta vulnerabilidad frente a un amplio número de eventos provocados por diversos procesos atmosféricos y oceánicos, que ocasionan peligrosas inundaciones sobre la superficie de la región. Especialmente en la zona de la capital de la región, Delap-Uliga-Djarrit (D.U.D.), al este, y en la zona sur, donde se encuentra el aeropuerto.

En el estudio desarrollado por [Ford et al., 2018] se realiza una recopilación de los eventos de inundación en Majuro desde 1979 a 2015, encontrando varios modos de inundación costera y del lago interior. En el listado se encuentran los eventos más importantes que tuvieron lugar en dicho periodo de tiempo, entre los que se incluyen aquellos que ocasionaron daños en las protecciones del aeropuerto o lo dejaron inoperativo, produciendo su cierre eventual.

Este trabajo consiste en proponer una posible metodología a partir de la cual se puedan predecir las horas al año en las que el Aeropuerto Internacional de Majuro se ha encontrado fuera de servicio a lo largo de los años 1993 a 2019, tomando como base para definir el umbral de operatividad, el listado de eventos mencionado anteriormente junto con los caudales de rebase resultantes obtenidos como producto final de este trabajo.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología para evaluar la operatividad del aeropuerto de Majuro, capital de las Islas Marshall, tomando como base la reconstrucción histórica de la serie de la tasa media de rebase anual [l/s/m] y run-up (Ru2%), obtenida a lo largo de tres perfiles representativos de la zona de estudio; y la recopilación histórica de eventos de inundaciones que ocasionaron la inoperatividad en el aeropuerto de Majuro.

Por otro lado, también es objeto de este trabajo realizar un estudio del comportamiento hidrodinámico del oleaje en su propagación a través de perfiles de arrecife con diferentes configuraciones.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1. Localización

Majuro es uno de los 34 atolones que conforman la República de las Islas Marshall, un país insular ubicado en el océano Pacífico, y oficialmente su capital (Figura 2).



Figura 2. Localización del atolón de Majuro, capital de las Islas Marshall, Oceanía. [Fuente: Google Maps]

Se trata de un atolón de 64 islas, con una superficie terrestre total de 9,7 km² y una laguna interior de 295 km², con una población de 31000 habitantes (2018); la mayoría ubicada en la capital, Delap-Uliga-Djarrit (D.U.D.) [CIA]. Este número supone aproximadamente un 52.4% de la población total actual de las Islas Marshall (59,190 habitantes en 2020), [US Census Bureau].

Los atolones se definen como islas coralinas oceánicas de baja altitud, generalmente con forma de anillo, que se forman cuando un arrecife de coral crece alrededor de una isla volcánica. El arrecife poco profundo queda expuesto en bajamar y sumergido en pleamar, ofreciendo una barrera de

protección frente a la llegada del oleaje que disipa la energía por rotura, fricción y turbulencia. En la propagación del oleaje a costa, se generan un set-up o sobreelevación de la lámina de agua sobre el arrecife de ~ 0.2 veces la altura de ola en rotura [Ford et al., 2018].

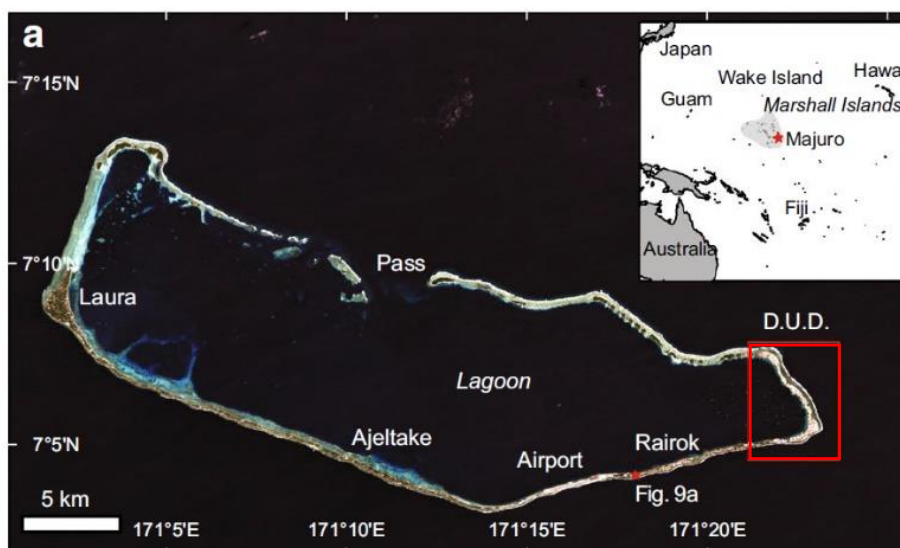


Figura 3. Atolón de Majuro [Fuente: Ford et al., 2018].

Concretamente, el aeropuerto de Majuro se encuentra en la zona sureste de la región, en las coordenadas $7^{\circ}04'08''\text{N}$ $171^{\circ}16'58''\text{E}$. Con una altitud máxima de 6 m y una orientación de 166N respecto al norte.

2. Dinámicas marinas

La marea en Majuro es semidiurna, con un rango en mareas vivas de 1.6 m e importantes diferencias entre pleamar y bajamar. Las mayores mareas vivas del año, llamadas “King tides” ocurren entre los meses de enero y marzo. El patrón de oscilación El Niño Southern Oscillation (ENSO) tiene un papel importante en las fluctuaciones interanuales del nivel del mar en la región, experimentando grandes anomalías durante la fase de La Niña [Ford et al., 2018].

El oleaje dominante en el atolón proviene de las direcciones norte y noreste, con una altura media en el cuadrante de 1.6 m, según se indica en el trabajo de (Ford et al., 2018). Además, en el mismo se recopilan los eventos más importantes de inundación que han tenido lugar en Majuro de los últimos 36 años, definiendo a su vez, 5 posibles modos de inundación:

- (1) Llegada de oleajes tipo *swell* generados en el norte y sur del Pacífico.
- (2) Tormentas tropicales y tifones, y los modos de inundación del lago interior.
- (3) Niveles de mar elevados durante la fase ENSO de La Niña.
- (4) Infiltración de los oleajes tipo *swell* en la laguna interior.
- (5) Oleaje generado por viento.

Esta investigación ofrece un soporte esencial para el desarrollo de este trabajo, ya que, gracias a la recopilación de eventos de inundación mencionadas anteriormente, se podrá determinar un umbral a partir del cual se pueda considerar inoperativo el aeropuerto de la capital de las Islas Marshall.

Por otro lado, la región está experimentando una rápida subida del nivel medio del mar. Majuro cuenta con un registro de nivel del mar desde 1969, separado en un periodo entre octubre de 1969 y diciembre de 1999 recogido por el Centro de Nivel del Mar de la Universidad de Hawaii (UHSLC) y por la Australian National Tidal Facility desde junio de 1993 hasta la actualidad. El registro combinado de mareógrafos presenta una tendencia de ascenso del nivel del mar de $3,3 \pm 0,6$ mm [Ford et al., 2018].

DATOS DE PARTIDA

1. Clima marítimo y atmosférico

1.1 Oleaje

Altura de ola (Hs) [m], periodo (Tp) [s] y dirección (θ) [$^\circ$] en la zona de estudio. Registro horario de 1980 a 2018.

La información de oleaje proviene del output del hindcast híbrido desarrollado a partir del hindcast CAWCR que intentaba acercar el oleaje a costa (TFM Alba Ricondo Cuevas). Para lo cual tomó como base de datos original el *hindcast* de oleaje desarrollado en Australia por CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) bajo el nombre CAWCR Wave Hindcast 1979-2019. En este hindcast se utilizó el modelo de oleaje WaveWatch III v4.08 en una malla global de $0.4 \times 0.4^\circ$ con una serie de mallas anidadas de 10 arco-minutos (~ 18 km) hasta 4 arco-minutos (~ 7 km) en las regiones del Pacífico Occidental y Australia (Figura 4). Todas las mallas fueron forzadas con vientos de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) horarios y de resolución espacial 0.3° . También se tuvieron en cuenta las concentraciones de hielo horarias de la base de datos del CSFR.

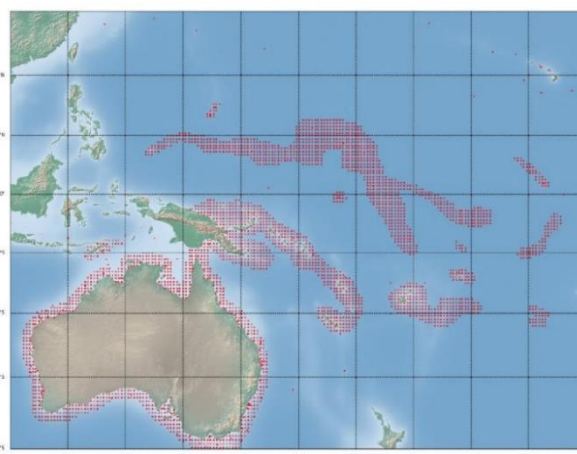


Figura 4. Base de datos CAWCR Wave Hindcast 1979-2019 – Resultado de parámetros del oleaje espectral en 3683 puntos entre el Pacífico Occidental y Australia.

Concretamente, el punto utilizado para este trabajo está situado en las coordenadas [Lat,Lon] = [7.0549, 171.277059] frente al aeropuerto, a 1045 m de la línea de costa, con una profundidad de 520 m, [Figura 5].



Figura 5. Ubicación del punto de hindcast de oleaje.

A continuación, se muestran las series históricas del hindcast de oleaje: H_s , T_p y θ , [Figura 6].

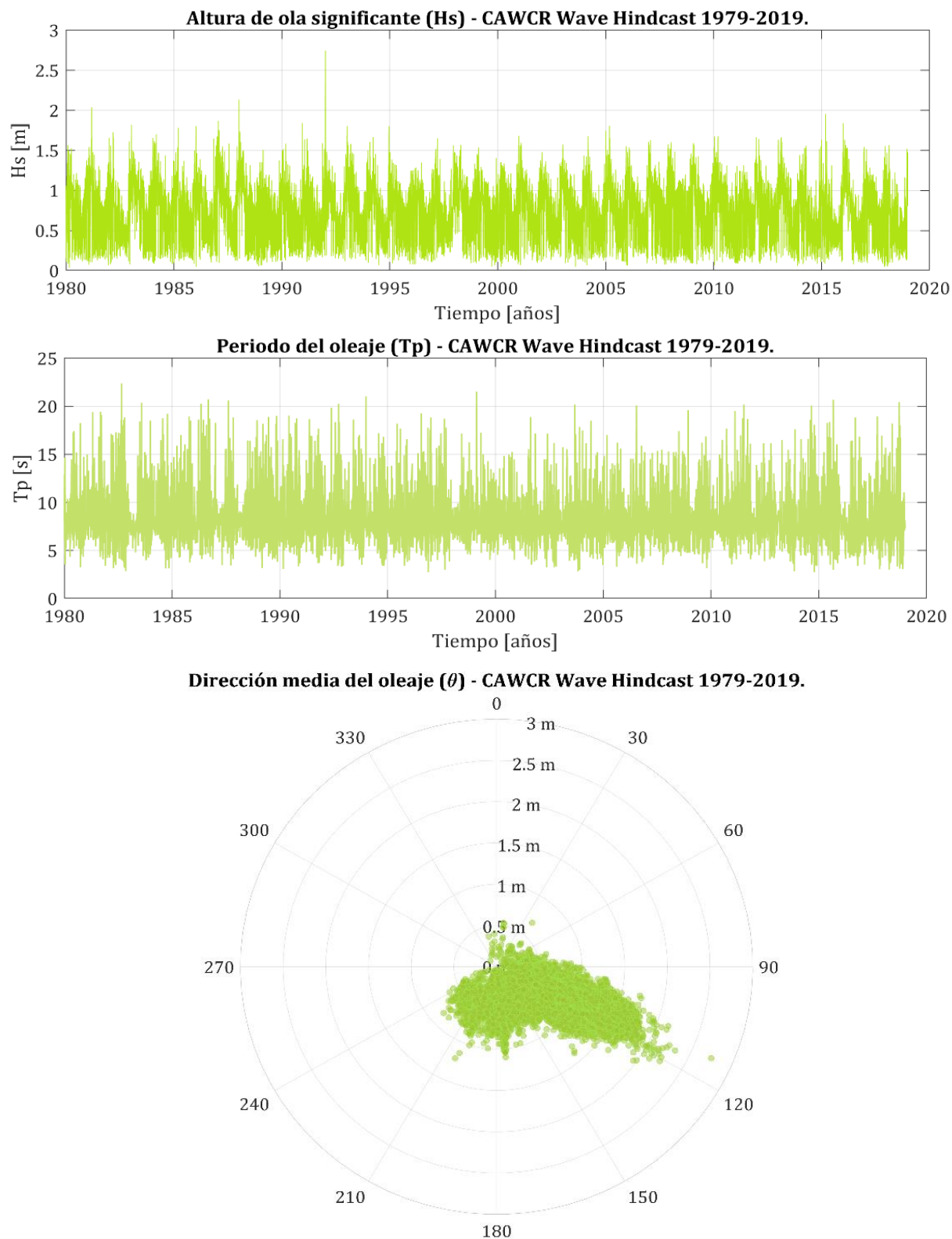


Figura 6. Registro histórico de la base de datos hindcast CAWCR Wave Hindcast 1979-2019, de los parámetros de oleaje H_s , T_p y θ .

Mediante estos gráficos, se puede observar que el oleaje máximo en los últimos 38 años ha logrado alcanzar una altura de 2.73 m, y una altura mínima de 0.03 m. Por otro lado, los periodos pico oscilan entre valores de 2.75 s hasta un máximo de 22.40 s. Por último, los oleajes proceden mayoritariamente del sur, y gracias al gráfico se pueden distinguir dos familias de oleaje. Una primera que se encuentra dentro del rango direccional [95-160], la cual se presenta con mayor frecuencia en la isla; y una segunda familia más pequeña con rango direccional muy acotado, próximo a los 180°.

1.2 Nivel del mar

Se trata de datos horarios del nivel del mar total, de 1993 a 2019. Esta información ha sido facilitada por la web de acceso público del banco global de información de nivel del mar: Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL). Concretamente, se ha utilizado el mareógrafo *MAJURO-C: 1838*, ubicado en la laguna interior del atolón de Majuro, cuya localización exacta corresponde con las coordenadas [Lon, Lat]= [171.372806, 7.106028].

Como se indica al principio de este apartado, los datos iniciales de nivel del mar están referidos al nivel total. En este caso, ha sido necesario referirlo al nivel medio, con motivo de mantener una coherencia a la hora de estudiar estos niveles con los perfiles de coral empleados más adelante. En el siguiente gráfico (Figura 7), se muestra la serie temporal del registro de nivel medio del mar.

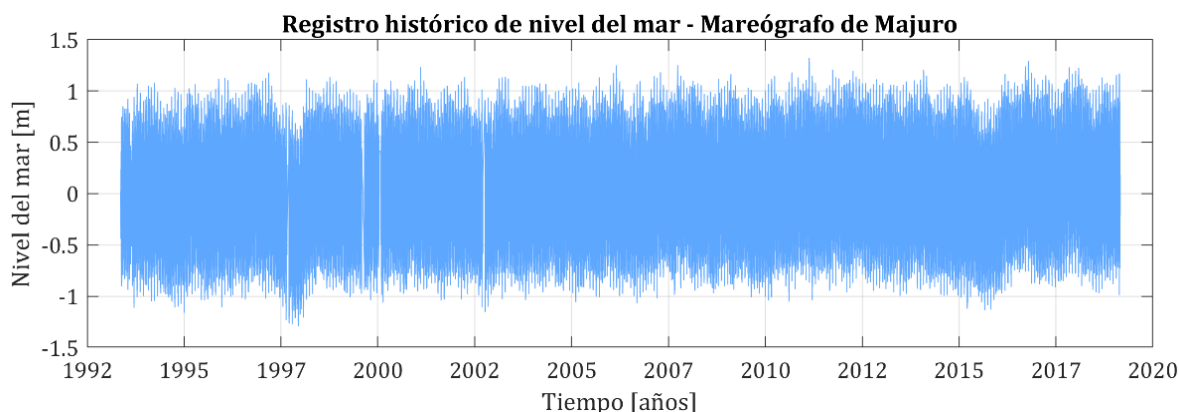


Figura 7. Registro histórico del nivel medio del mar, registrado por el mareógrafo 1838 del Atolón de Majuro.

Se puede observar que el nivel medio del mar se encuentra en el rango de -1.30 y 1.30 m, aproximadamente, con una carrera de marea de 2.6 m.

1.3 Viento

Velocidad [m/s] y dirección [°] del viento con datos horarios de 1993 a 2019, registro representado en la rosa de viento que se muestra en la Figura 8.

Esta información ha sido obtenida a partir de la base de datos de reanálisis NCEP CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*), con los que se forzó el *hindcast* de CSIRO.

A continuación, se muestra la rosa del viento [Figura 8], en la cual se representan los parámetros correspondientes a la velocidad y dirección de procedencia del viento, y también la frecuencia de aparición del mismo.

Se puede observar que el viento procede mayoritariamente del primer cuadrante, especialmente de la dirección NE, la cual está dominada por los vientos alisios, con una frecuencia de casi 12% y velocidades situadas en el rango de 0 a 10 m/s, y también se ve que existen vientos procedentes del resto de direcciones con velocidades entre 0 y 5 m/s, con frecuencias de aparición <2.4%.

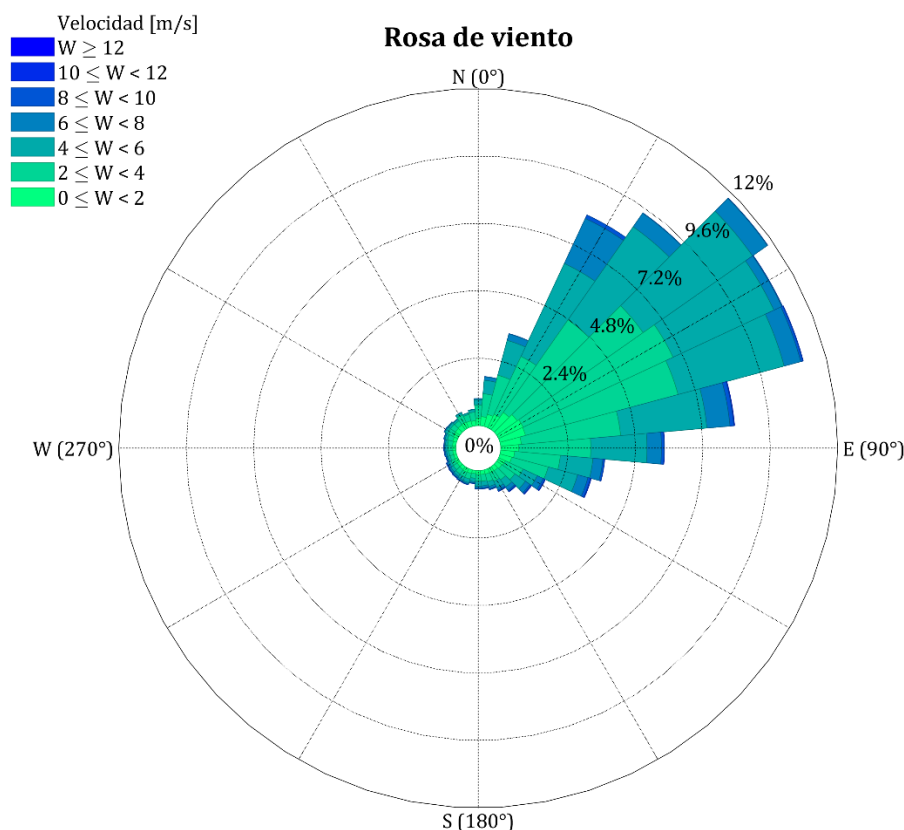


Figura 8. Rosa de viento - Muestra la velocidad del viento según los colores indicados en la leyenda, la frecuencia con la que se dan los valores y la dirección con la que incide el viento.

2. Información topo-batimétrica.

La batimetría de la zona de estudio se ha obtenido a partir del modelo digital de elevación topo batimétrico de 1 m de resolución (*One Meter Topobathymetric Digital Elevation Model (TBDEM) for Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, 1944 to 2016*), desarrollado por el USGS (United States Geological Survey) Coastal National Elevation Database (CoNED) Applications Project.

Dicha información ha sido procesada mediante la herramienta **QGis3**, aplicación profesional de SIG de Software Libre y Código Abierto (FOSS). A través de esta herramienta, se han podido distinguir las distintas elevaciones / profundidades, ajustadas al nivel medio del mar local y, además, se incluye una extensión del este de la isla de Majuro que muestra una mayor profundidad *offshore*, tal como se observa en la Figura 9.

Las aguas que rodean el área territorial del atolón de Majuro son consideradas relativamente someras y su batimetría se encuentra pobremente cartografiada. Sin embargo, tanto el Océano Pacífico como la laguna interior se constituyen por aguas profundas y con pendientes muy pronunciadas.

La mayor elevación que se puede encontrar en el atolón de Majuro, en zona habitada, se estima en 3 m sobre el nivel del mar, en la localidad de Laura, al oeste de la isla [Ford et al., 2018]. Es por este motivo que el país dispone de una extremada vulnerabilidad frente a eventos que incrementen el nivel del mar, tsunamis, marea meteorológica, inundaciones costeras, y cambio climático, ya que esto puede afectar directamente sobre las infraestructuras, las aguas subterráneas y los ecosistemas que tienen lugar en este entorno.

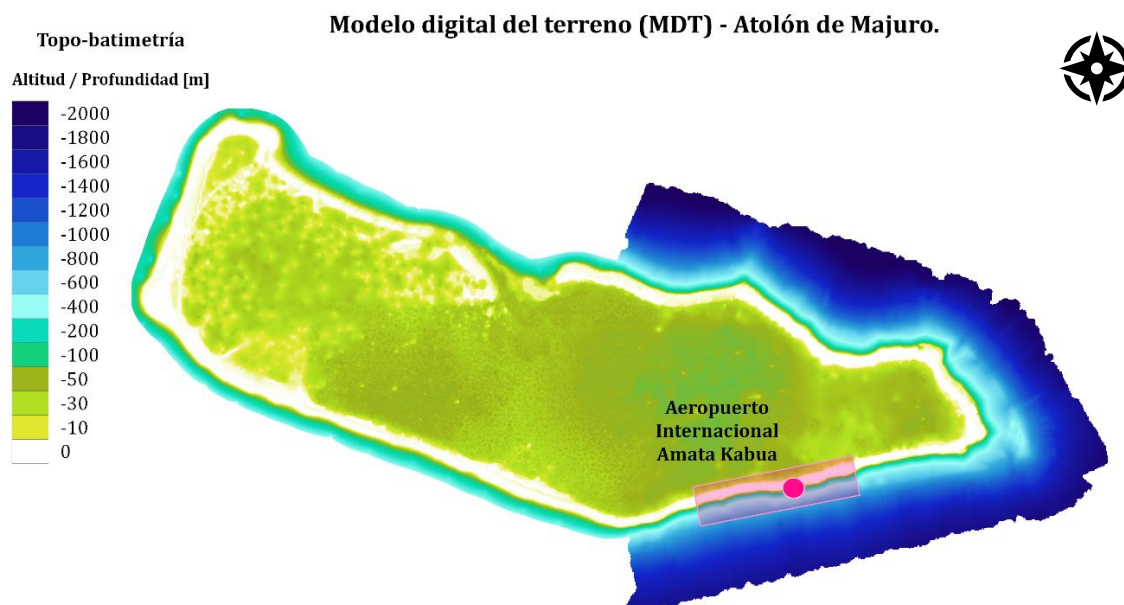


Figura 9. Modelo digital del terreno (MDT). Información topo-batimétrica referente al Atolón de Majuro.

MODELO HIDRODINÁMICO SWASH

SWASH (Simulating WAVes till SHore) es una herramienta de modelado numérico de propagación de oleaje basada en las ecuaciones *non-linear shallow water* (NLSW) con un término de presión no hidrostática. Este modelo permite reproducir y predecir las dinámicas de las zonas “surf” y “swash”, resolviendo las ecuaciones de continuidad y momento, y, opcionalmente las ecuaciones de conservación del transporte de la salinidad, temperatura y cargas suspendidas por sedimentos cohesivos y no-cohesivos.

Tanto en el análisis de sensibilidad como en la metodología empleada más adelante, se hace uso del modelo SWASH 1D, es decir, se trata de un modelo unidireccional que, por tanto, no tiene en cuenta la dirección del oleaje.

Para facilitar el uso del modelo hidrodinámico SWASH, el conjunto de códigos de pre – proceso, simulación numérica y post – proceso, han sido proporcionados a partir de un *Jupyter Notebook* programado en lenguaje Python.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO SWASH

Previo a la aplicación de la metodología expuesta en este trabajo, se ha procedido a la realización de un análisis del modelo SWASH, con motivo de conocer la sensibilidad del mismo frente a la propagación del oleaje.

El análisis de sensibilidad que se presenta a continuación consiste, en esencia, en analizar los procesos transformación que sufre el oleaje en su propagación hasta el pie de playa y la variación que experimentan los mismos en función de las características del clima con las que se fuerza el modelo hidrodinámico SWASH (oleaje, nivel del mar y viento).

El modelo hidrodinámico también permite conocer el recorrido de run-up que es superado el 2% de las veces por el oleaje incidente ($Ru2\%$), así como la tasa de rebase instantánea (q_{swash}) que se registra sobre un sensor específico de la malla de cálculo.

Por tanto, también se analizan las respuestas obtenidas en los distintos perfiles de coral analizados en términos de caudal de rebase y run-up ($Ru2\%$).

Los perfiles analizados serán los mismos que se seleccionan más adelante, empleados en la metodología propuesta para la determinación de la operatividad en el Aeropuerto Internacional Amata Kabua (ver apartado 3 del epígrafe: *Metodología*).

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, se han realizado una serie de pruebas, las cuales han consistido en modificar los valores de los parámetros de entrada al modelo, de tal manera que se puedan apreciar cambios significativos en la propagación del oleaje, en los niveles de run-up y en las tasas de rebase instantáneas, entre un perfil y otro. Con el objetivo principal de poder establecer una relación directa con las condiciones del clima marítimo, así como con el tipo de perfil, en caso de existir dichas diferencias.

1. Descripción de las pruebas

Con carácter general, se pueden clasificar las pruebas realizadas en 3 grupos principales.

Puesto que el nivel de mar es una variable determinista, se ha decidido estudiar la respuesta frente a tres niveles medios del mar distintos; por lo que cada grupo estará asociado a un nivel del mar concreto. De tal forma que el primer grupo se ha evaluado considerando el nivel medio del mar a la cota -1.5 m, el segundo a 0 m y el tercero a 1.5 m.

Todos los grupos siguen la misma estructura, variando como se muestra en el esquema (Figura 10), la velocidad del viento, la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p).

De esta manera, cada perfil seleccionado (3 perfiles) será evaluado para cada uno de los tres grupos mencionados anteriormente. Llegando a realizar un total de 18 pruebas en cada grupo, lo que supone un total de 54 pruebas por perfil. Es decir, se han realizado finalmente un total de 162 pruebas.

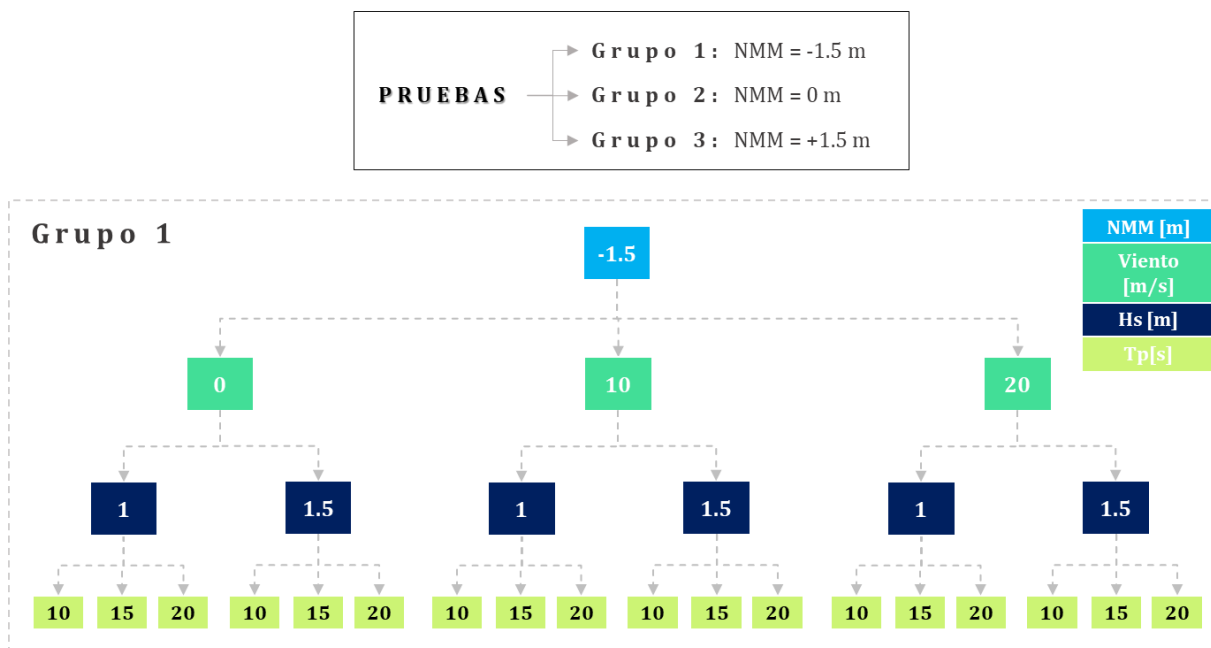


Figura 10. Esquema indicativo de las condiciones de oleaje analizadas en cada prueba, para cada nivel de mar y para cada perfil.

Los valores que figuran en el esquema anterior han sido escogidos en función de las características que se pueden dar en la zona de estudio; a excepción de los valores del viento, que se ha intentado abarcar un rango más amplio para estudiar la influencia del mismo sobre los perfiles con mayor claridad.

Además de estos valores, se han tenido en cuenta una serie de factores comunes para todas las pruebas:

- Se han realizado simulaciones de 3600 s, con un calentamiento del modelo del 15% sobre el total (540 s). Con este periodo de simulación, se consiguen simular al menos 100 olas, dando lugar a un resultado estable para realizar este análisis de sensibilidad.
- En cuanto a la generación del oleaje, las simulaciones se han realizado a través de la generación de un espectro Jonswap con oleaje tipo *swell* ($\gamma=10$), como se ha podido observar a partir de ver rosas de oleaje o espectros donde la mayor parte de la energía se acumula en franjas de bajas frecuencias.
- Se ha incluido una plataforma horizontal previa a cada uno de los perfiles, de 30 m de profundidad (comienzo de los perfiles) y 700 m de largo (equivalente a aproximadamente 2 veces la longitud de onda incidente), con motivo de asegurar que la onda incidente sobre el perfil sea lo más semejante a la realidad posible. En caso de no disponer dicha plataforma, el forzamiento (oleaje) incide directamente sobre el perfil cuya batimetría resulta prácticamente vertical y este hecho conduciría a inestabilidades del modelo.
- Se ha considerado un coeficiente de fricción de Manning igual a 0.01. Se trata de un valor estándar empleado en perfiles de coral, ya que en este trabajo no se dispone de información referente a la fricción. Se ha definido desde el comienzo del perfil en cuestión

(-30 m) hasta la línea de playa (0 m), por lo que el rango de actuación de la fricción varía en función de la topografía de cada perfil, correspondiente con los valores que se muestran a continuación:

1. **Perfil 14:** 700 - 825 m

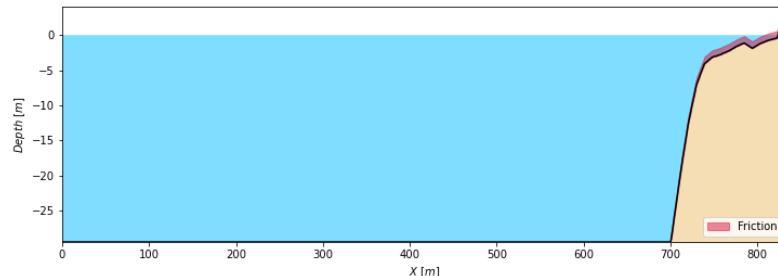


Figura 11. Perfil topo-batimétrico 14.

2. **Perfil 1:** 700 - 865 m

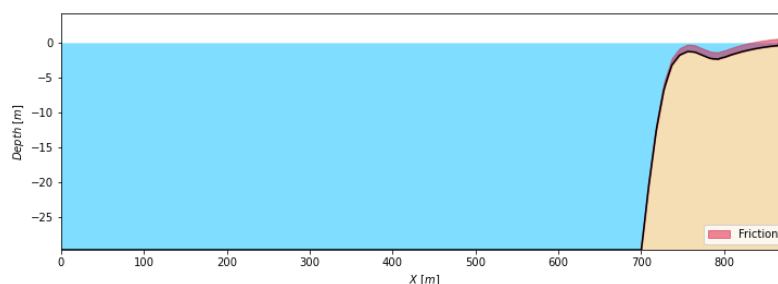


Figura 12. Perfil topo-batimétrico 1.

3. **Perfil 2:** 700 - 905 m

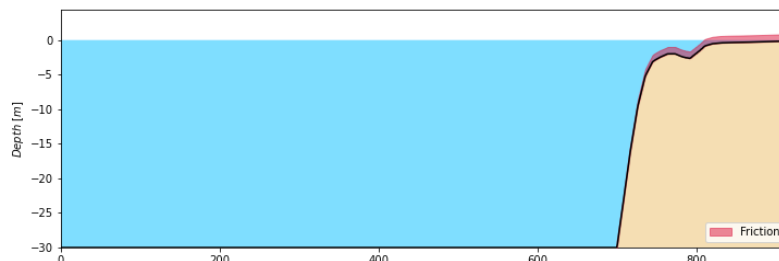


Figura 13. Perfil topo-batimétrico 2.

2. Resultados

2.1 Descripción

Se han dispuesto una serie de sensores de medida cada 5 m a lo largo de la malla de cálculo de los cuales han sido extraídas las series de nivel del mar instantáneas [m], así como las series de rebase y run-up correspondientes al último sensor, ubicado en el punto de máxima altitud de cada perfil.

Estos datos a su vez han sido procesados mediante la aplicación de herramientas del análisis estadístico y espectral del oleaje a corto plazo, obteniendo información de parámetros del oleaje, como la altura de ola y el periodo, a partir de la serie temporal de desplazamientos de la superficie libre.

Por un lado, en lo que respecta al análisis estadístico, el criterio más utilizado para la definición de las olas es el de pasos ascendentes por cero. A partir de la Transformada rápida de Fourier (FFT) se obtienen las alturas de ola y los periodos individuales (H_i , T_i). Entendiendo como altura de ola individual la distancia vertical máxima entre dos pasos ascendentes por cero y el periodo individual como el intervalo de tiempo entre dos pasos ascendentes por cero.

Una vez obtenidas las alturas de ola individual, se han ajustado dichas series a una distribución de tipo Rayleigh, por medio de la siguiente función:

$$p(H) = \frac{H_i}{4m_0} \exp\left(-\frac{H_i^2}{8m_0}\right)$$

Donde H_i es la altura de ola individual y m_0 el momento de orden 0, hallado mediante la expresión:

$$m_0 = \eta_{rms}^2$$

Donde, η_{rms} es el desplazamiento vertical medio cuadrático de la superficie libre.

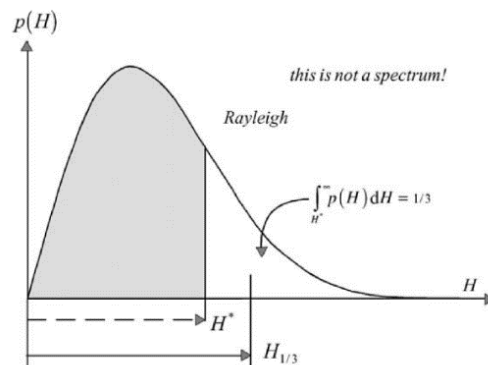


Figura 14. Función de distribución de la altura de ola individual siguiendo la expresión de Rayleigh. [Fuente: Waves in Oceanic and Coastal Waters. Leo H.Holthuijsen]

Además, se ha determinado la altura de ola significativa como:

$$H_{m0} \approx 4\sqrt{m_0}$$

$$\text{Banda estrecha} \rightarrow H_s = H_{m0}$$

Por otro lado, la superficie libre se distribuye según una normal de media 0, ya que se trata de un proceso estocástico estacionario, a través de la siguiente función de densidad:

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{\eta_{rms}^2}\right)$$

Finalmente, a partir de la tasa de rebase instantánea, se obtiene el volumen de rebase (Q [m³/m]), como el volumen total integrado en el tiempo que dura el evento de rebase en cada caso. Dando a

conocer de esta manera el número de eventos de rebase que se tienen a lo largo de la simulación. Con este volumen, se ha determinado el histograma de rebase y se ha ajustado a una distribución de Pareto.

Los resultados *tipo* se presentan a continuación a modo de ejemplo y han sido generados como consecuencia de la combinación del producto final que devuelve el modelo numérico y la aplicación de la estadística del oleaje a corto plazo.

Resultados tipo 1

Por orden descendente, de izquierda a derecha:

- **Gráfico 1:** Energía del oleaje. Permite analizar las variaciones de energía que presenta el oleaje en el proceso de propagación hacia la línea de costa, mostrando la distinción entre la energía correspondiente a la onda incidente (H_{IC}) y a la infragravitatoria (H_{IG}), así como a la de muy baja frecuencia (*Very Low Frequency*, H_{VLF}). Para diferenciar el comportamiento de cada tipo de onda, se han decidido establecer los siguientes rangos de frecuencia: $0.001 < f < 0.004$, onda de muy baja frecuencia; $0.004 < f < 0.04$, onda infragravitatoria y $f > 0.04$, onda incidente, [Cheriton et al., 2016].
- **Gráfico 2:** Altura de ola. Permite analizar las variaciones de altura de ola que experimenta el oleaje en el proceso de propagación hacia la línea de costa, haciendo referencia a las ondas anteriormente mencionadas.
- **Gráfico 3:** Envolvente de superficie libre sobre el perfil transversal. En él se puede ver, por un lado, el nivel de la superficie libre del mar (η), el set-up, la posición del sensor donde se mide el caudal de rebase; y, por otro lado, se señala el coeficiente de reflexión que presenta el perfil (K_r), la profundidad máxima del perfil (h_0) y la medida de las celdas de la malla de cálculo en horizontal (dx).
- **Gráfico 4:** Serie de nivel del mar a lo largo de la simulación ($3600 \text{ s} + 15\% \cdot 3600$ de calentamiento = 4140 s).
- **Gráfico 5:** Serie de run-up: serie temporal de la excursión ascendente y descendente de la ola sobre el talud. A partir de estos valores se obtiene el Ru2% como el valor del cuartil del 98%, considerado como el que es superado por el 2% de las olas incidentes.
- **Gráficos 6 y 7:** a la izquierda, se observa la serie de superficie libre instantánea, registrada por cada sensor individual; a la derecha, se observa el espectro de oleaje asociado a dicha serie, obtenido mediante la Transformada de Fourier.

Resultados tipo 1

Información característica del oleaje (E , H , η , espectro) + series de $Ru2\%$ y Q .

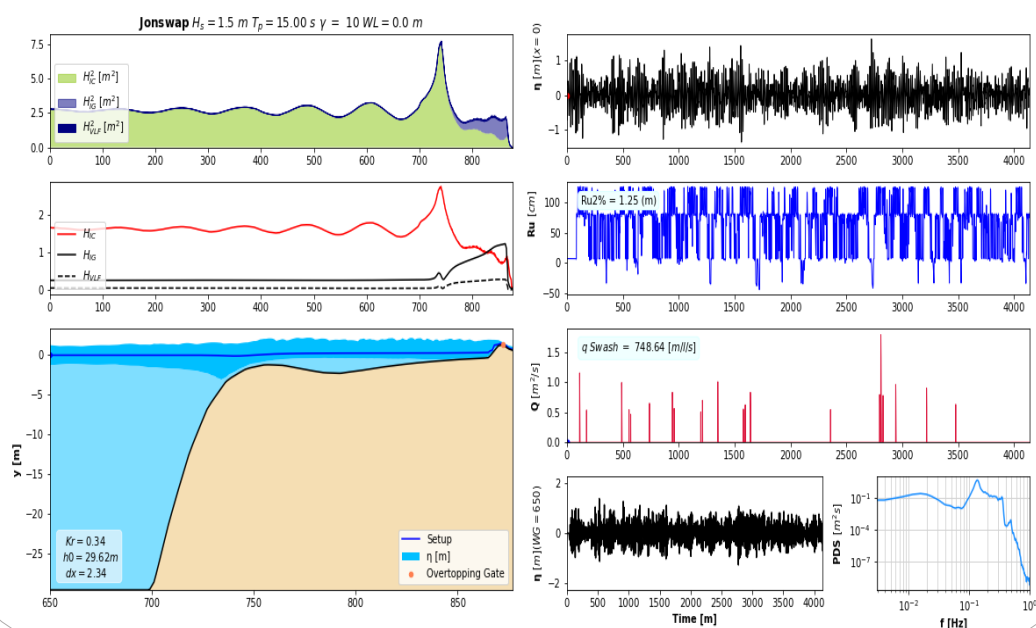


Figura 15. Ejemplo de resultados obtenidos tipo 1.

Resultados tipo 2

Por orden descendente, de izquierda a derecha:

- **Gráfico 1:** Histograma de la serie de alturas de olas individuales observadas para cada instante de tiempo a lo largo de toda la simulación y su ajuste a la distribución de Rayleigh. Se muestra además la altura de ola significativa (H_s).
- **Gráfico 2:** Histograma de la serie de caudal total obtenido a lo largo de la simulación y su ajuste a una distribución de Pareto.
- **Gráfico 3:** Histograma de la serie de superficie libre para cada instante de tiempo a lo largo de toda la simulación y su ajuste a la distribución normal.
- **Gráfico 4:** Serie de la tasa de rebase instantáneo que devuelve el modelo hidrodinámico SWASH como resultado para toda la simulación en el punto de máxima altitud correspondiente para cada perfil.
- **Gráfico 5:** Serie de eventos de rebase en el tiempo.

Resultados tipo 2

Histogramas de H_s , q y η ; y series de q y Q .

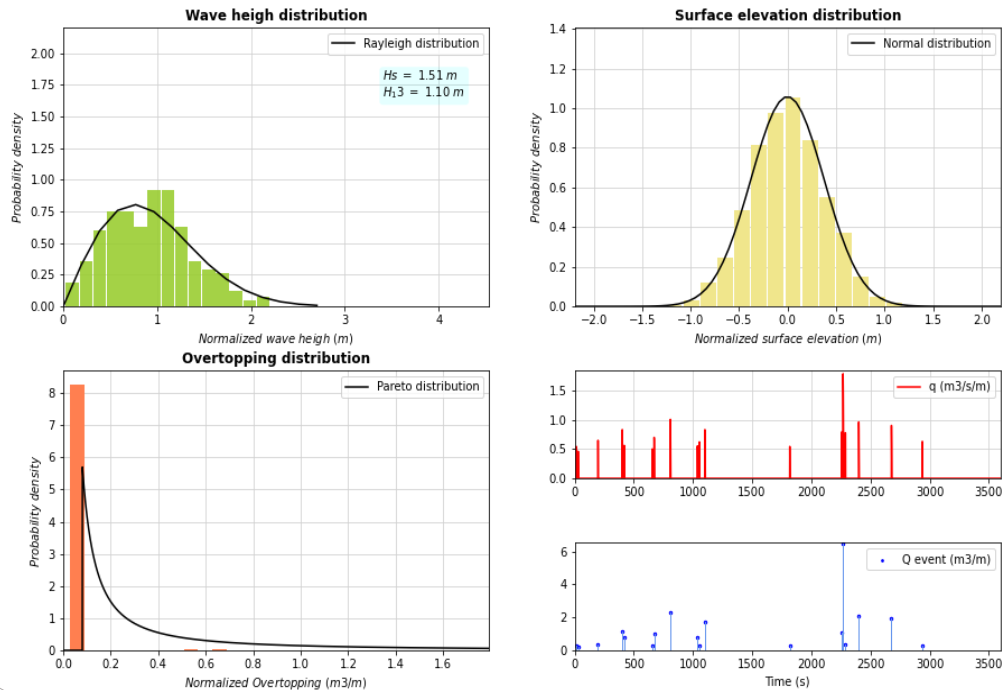


Figura 16. Ejemplo de los resultados obtenidos tipo 2.

2.2 Comentarios

Con los resultados se han podido analizar los procesos de transformación del oleaje en los distintos perfiles, considerando al mismo tiempo la influencia de:

- Nivel del mar.
- Viento.
- Altura de ola significativa (H_s).
- Periodo pico (T_p).

Para empezar a analizar los resultados, se observa la **relevancia del nivel del mar**. La principal diferencia que se encuentra cuando existe variación del nivel medio del mar está en la rotura del oleaje y en el recorrido del run-up, que abre paso a la posibilidad de que se produzcan rebases de mayor caudal o con mayor frecuencia cuanto más se incrementa el nivel.

Se ha escogido el perfil 1 como ejemplo (Figura 17), ya que permite ver las diferencias mencionadas anteriormente. Corresponden con las pruebas 1 y 3, cuyas condiciones son:

- **Prueba 1:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s, nivel del mar = -1.5 m.
- **Prueba 3:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s, nivel del mar = 0 m.

En primer lugar, se observan dos tramos diferenciados en la zona de rompientes. Se puede ver cómo al aumentar el nivel del mar de -1.5 a 0 m, en el tramo inicial (rosa) se disipa la energía del oleaje de forma brusca, perdiendo más de 1 m de altura de ola, mientras que en el segundo tramo (naranja), lo hace de una manera más progresiva al disponer de una lámina de agua con mayor volumen sobre la plataforma, pasando de 1 m hasta perder por completo la energía al llegar a la zona de playa. Mientras que en el caso 3 (nivel de -1.5 m), la rotura se produce más bruscamente en el tramo inicial, pasando en pocos metros de distancia de una altura de 2.52 m a 0.5 m y, más adelante, en el tramo final, continúa reduciéndose suavemente por completo hasta la zona de playa.

También es interesante remarcar que el aumento significativo que experimenta la energía del oleaje puede darse debido al alto coeficiente de reflexión que presentan los perfiles, ya que el oleaje incidente se refleja y se encuentra con la siguiente onda incidente, esto hace que, al combinarse ambas ondas, su amplitud aumente (a).

Por otro lado, se muestran también las series de Ru2% y rebase que experimenta el perfil en ambos casos de nivel del mar, donde pasa de un recorrido máximo de Ru2% = 0.15 a uno de 1.15 m al aumentar 1.5 m en nivel.

Por último, se muestra la tasa de rebase instantánea que devuelve el modelo hidrodinámico, pasando de ser 0 l/s/m a 445.90 l/s/m, es decir, en este caso en particular, aumentando el nivel del mar se produce rebase.

Los estudios realizados para los perfiles restantes en relación a la subida del nivel del mar muestran resultados análogos a los del perfil 1.

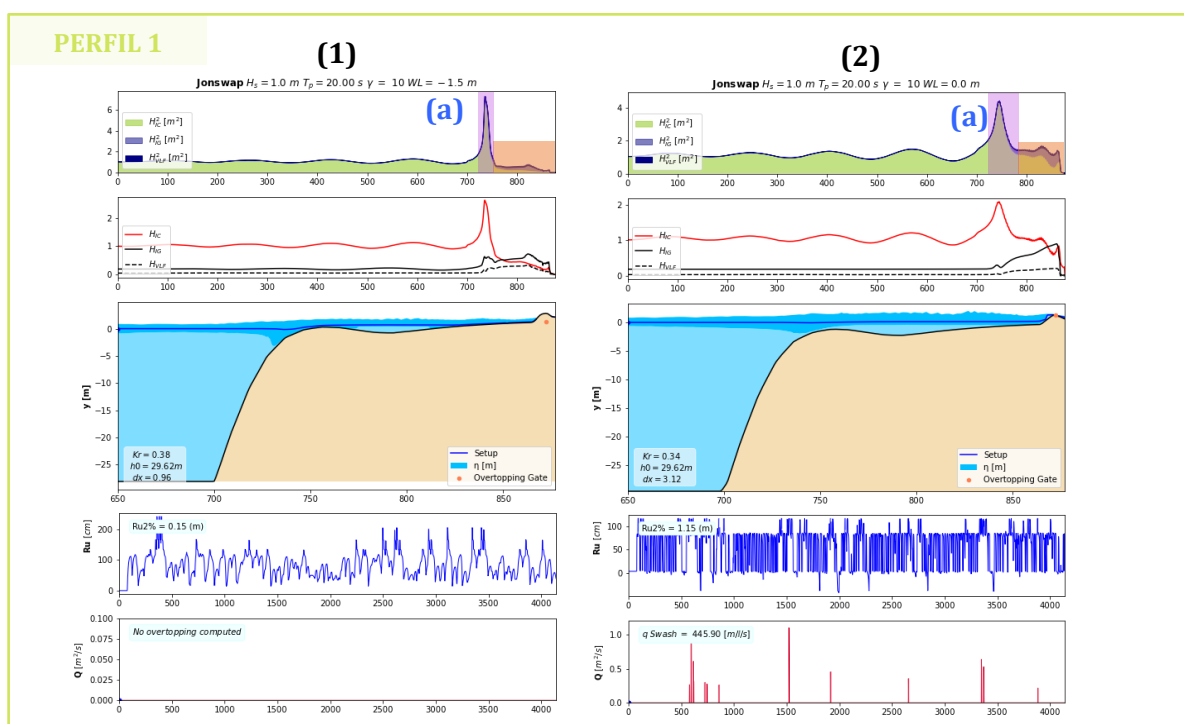


Figura 17. Ejemplo del comportamiento del perfil 1 frente a nivel del mar (1) -1.5 y 0 m (2).

En cuanto a la **influencia del viento** en los perfiles, se han estudiado velocidades de viento de 0, 10 y 20 m/s .

En la Figura 18 se muestran los resultados correspondientes a las pruebas 1, 7 y 13, cuyas condiciones de oleaje son:

- **Prueba 1:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.
- **Prueba 7:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 10$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.
- **Prueba 13:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 20$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.

En los gráficos que muestra la figura se puede observar cómo aumenta significativamente la altura de ola máxima del oleaje incidente, obteniendo una diferencia de 0.10 m entre un oleaje sin viento y el mismo oleaje con velocidad del viento igual a 20 m/s. Por otro lado, se observa también un aumento del Ru2% desde -0.31 hasta -0.22 m, lo que supone otros 0.10 m.

Los resultados de los demás perfiles son análogos a los del perfil 1.

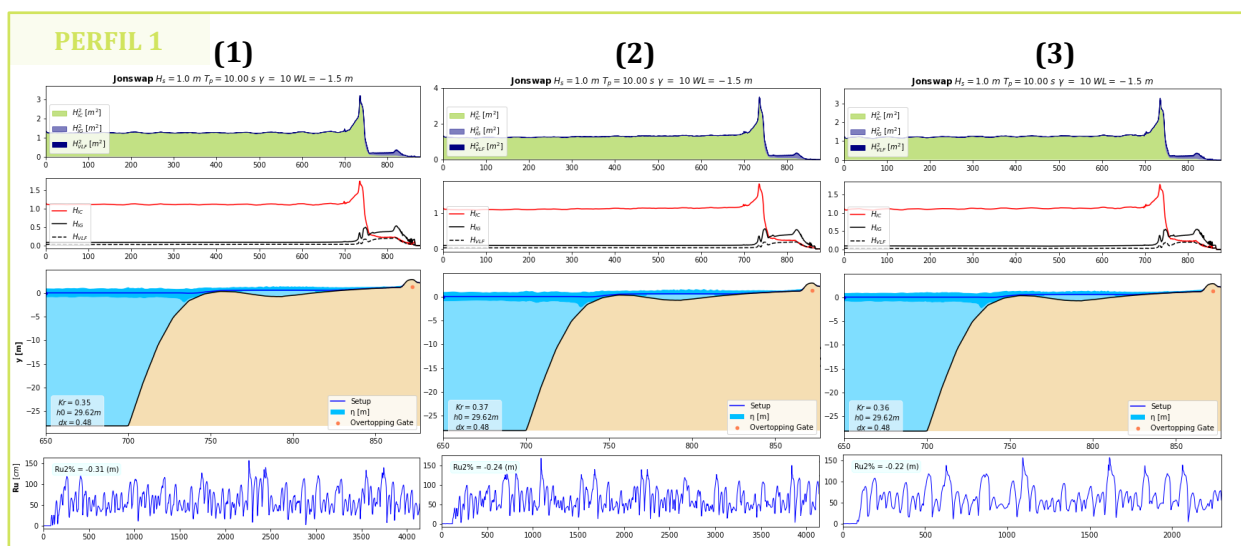


Figura 18. Ejemplo del Perfil 1 en cuanto a la variación del viento: (1) 0 m/s, (2) 10 m/s y (3) 20 m/s.

Para estudiar la **influencia de la altura de ola significativa (H_s)** en los diferentes perfiles, se han seleccionado los casos 3 y 6, cuyas condiciones son:

- **Prueba 3:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.
- **Prueba 6:** $H_s = 1.5$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.

Primero se estudia la influencia en los procesos de propagación (Figura 19) y después en las series de nivel del mar, Ru2% y rebase (Figura 20).

Figura 19:

En esta figura se muestran los gráficos correspondientes a los procesos de propagación de oleaje que se producen respectivamente en cada perfil señalado, para cada caso indicado anteriormente. Mostrando para cada perfil a la izquierda la prueba 3 y a la derecha la 6.

Analizando cada perfil de manera individual, se puede observar lo siguiente:

- (1) En términos de energía del oleaje, se observa cómo aumenta significativamente la energía tanto de la onda incidente como de la infragravitatoria, llegando casi a duplicar el valor de la energía de la onda incidente para todos los perfiles, mientras que en la onda infragravitatoria se observan unos resultados algo distintos en función del tipo de perfil. En los perfiles 14 y 1 parece que el incremento que experimenta es en torno al 30%, mientras que en el perfil que presenta una mayor plataforma coralina (perfil 2) se incrementa en torno al 50%.
- (2) En términos de altura de ola, se puede apreciar ligeramente que la rotura del oleaje, en el caso de mayor altura de ola, se produce unos metros antes para menor fondo.

Analizando los perfiles entre sí, se observan grandes diferencias. Para empezar, la influencia del ancho de la plataforma coralina transversal del perfil hace que el proceso de propagación cambie de un perfil a otro. Si bien es verdad que la rotura del oleaje parece producirse en el mismo punto (próximo a los 750 m, es decir, 50 m desde el inicio del perfil) en los tres perfiles, los mecanismos de disipación de energía que ofrece cada perfil cambian en función de su batimetría. Esto es debido a que, al propagarse sobre el arrecife, aparecen otros procesos, además de la disipación por rotura, como son la fricción de fondo y la turbulencia.

Por último, se puede observar cómo la reflexión depende totalmente del tipo de perfil que se evalúe. El perfil de menor plataforma coralina no experimenta cambios en el coeficiente de reflexión, mientras que, a medida que se va incrementando la plataforma, parece que dicho coeficiente comienza a disminuir. En el perfil 2, con un ancho de plataforma de 165 m, se observa una disminución poco significativa ($0.38 \rightarrow 0.36$); pero en el perfil con mayor ancho de plataforma (205 m), la diferencia podría decirse que comienza a ser relevante ($0.37 \rightarrow 0.28$). Por tanto, se podría concluir que una característica de los perfiles con ancho de plataforma superior a los 200 m comienza a ser significativamente menos reflejante a medida que aumenta la altura de ola significativa.

Figura 20:

En esta figura se enseñan los gráficos correspondientes con la serie de run-up del 2% y rebase que se produce respectivamente en cada perfil señalado, para cada caso indicado anteriormente. Mostrando para cada perfil a la izquierda la prueba 3 y a la derecha la 6.

Analizando los perfiles individualmente, se aprecia un aumento muy significativo del Ru2% al producirse el aumento de altura de ola. Observándose unas diferencias de 0.80, 0.84 y 0.80, respectivamente en cada perfil. Es decir, al aumentar la altura de ola 0.5 m, la diferencia de run-up casi alcanza el metro de distancia en vertical.

Por otro lado, como consecuencia del aumento del run-up, se producen eventos de rebase. En la prueba 3, con una altura de ola de 1 m y un nivel del mar bajo, no se registran eventos de rebase durante la simulación; mientras que, en la prueba 6, al producirse un aumento de 0.5 m en la altura de ola, se aprecian algunos eventos de rebase.

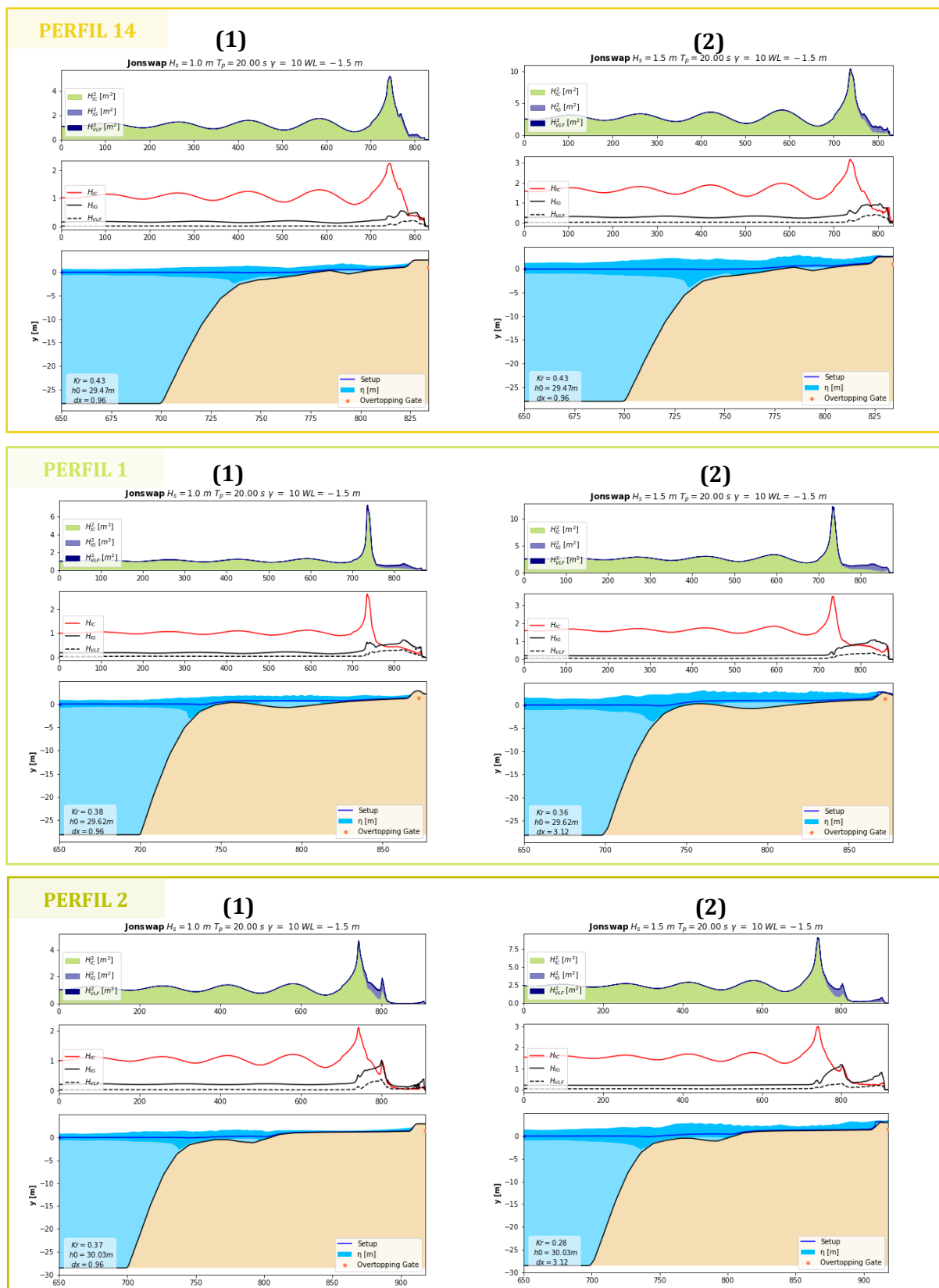


Figura 19. Análisis comparativo - Resultados de las series de nivel del mar, run-up ($Ru2\%$) y rebase, para los perfiles 14, 1 y 2, sometidos a las mismas condiciones de oleaje, exceptuando el parámetro (1) $H_s = 1$ m vs (2) $H_s = 1.5$ m.

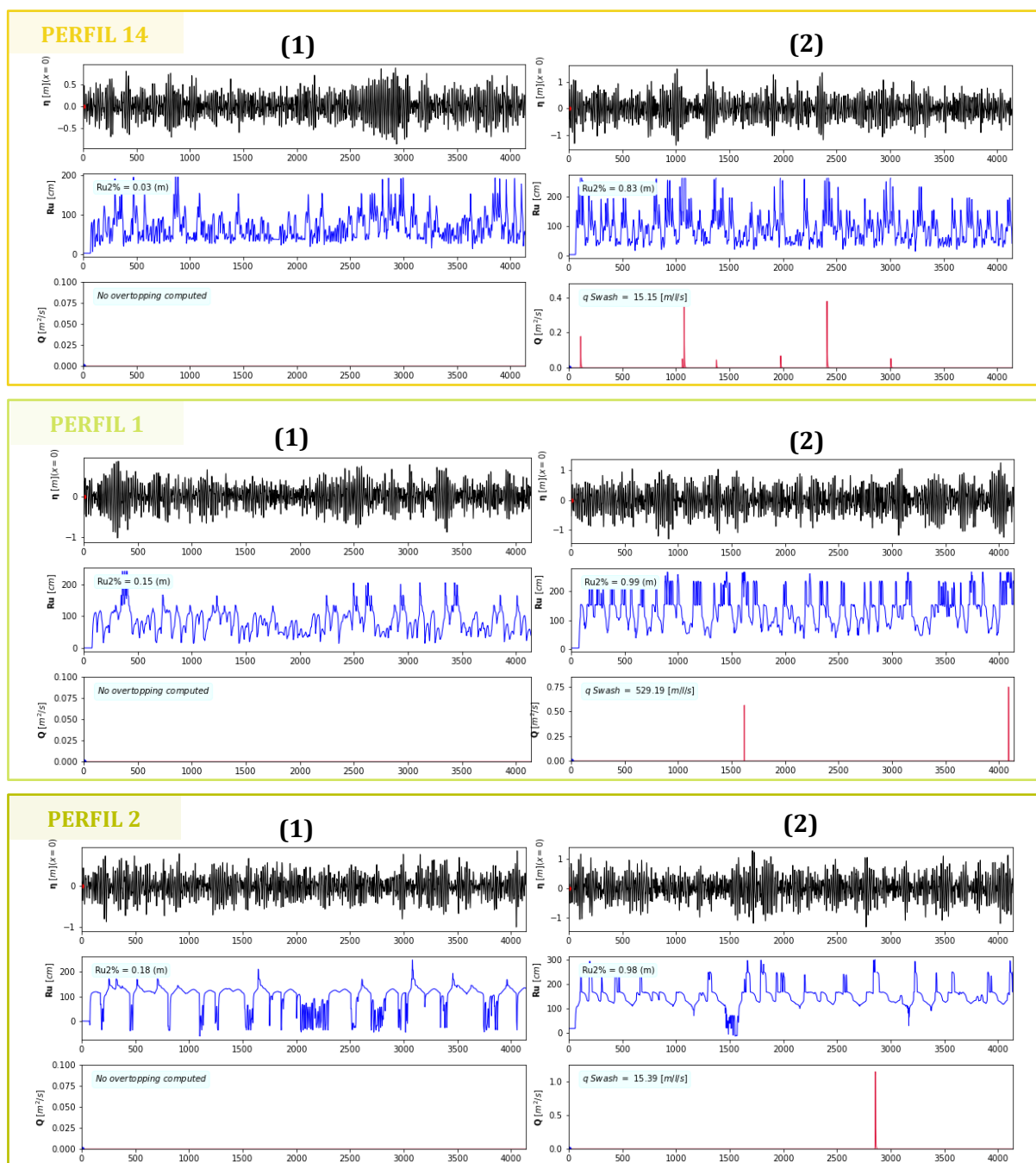


Figura 20. Análisis comparativo - Resultados de las series de nivel del mar, run-up (Ru2%) y rebase, para los perfiles 14, 1 y 2, sometidos a las mismas condiciones de oleaje, exceptuando el parámetro (1) $H_s = 1$ m vs (2) $H_s = 1.5$ m.

Por último, para estudiar la **influencia del periodo pico** (T_p), se han seleccionado los casos 19, 20 y 21, cuyas condiciones son:

- **Caso 1:** $H_s = 1$ m, $T_p = 10$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.
- **Caso 2:** $H_s = 1$ m, $T_p = 15$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.
- **Caso 3:** $H_s = 1$ m, $T_p = 20$ s, $W = 0$ m/s y nivel del mar = -1.5 m.

Primero se estudia la influencia en los procesos de propagación (Figura 21) y después en las series de nivel del mar, $Ru2\%$ y rebase (Figura 22).

Figura 21:

Observando los perfiles de manera individual, se puede observar lo siguiente:

- (1) En términos de energía del oleaje, aunque la altura de ola significativa con la que se fuerza el modelo se mantenga en 1 m, a medida que se aumenta el periodo de la onda, se observa cómo las fluctuaciones en la altura de ola van incrementando. Esto puede darse debido a que las ondas con periodos más largos viajan con mayor energía y al llegar a pie de playa, la energía reflejada sea mayor.
- (2) Además, también se incrementa la altura de ola máxima de cada perfil, donde pasa de ser de 1.61 m en el caso 1 del perfil 14 a 1.95 m y 2.27 m en los casos 2 y 3, respectivamente; de 1.79 m en el caso 1 del perfil 1 a 2.28 m y 2.73 m en los casos 2 y 3, respectivamente; y de 1.74 m en el caso 1 del perfil 2 a 2.11 m y 2.42 m en los casos 2 y 3, respectivamente.
- (3) Por otro lado, si observamos el primer y el segundo gráfico, se puede ver cómo afecta el periodo a la rotura del oleaje, la cual parece presentar mayores inestabilidades cuanto más grande es el periodo. Se observa cómo a medida que el periodo aumenta, la energía con la que llega a costa es cada vez mayor y, aunque no se aprecie con claridad en los resultados obtenidos, la onda infragravitatoria libera cada vez más energía en el proceso de rotura.

Figura 22:

En lo que respecta a las series de run-up, se muestran en la figura 22 los casos de $T_p = 10$ s y $T_p = 20$ s, para apreciar mejor los efectos del periodo en el resultado.

Se observa un aumento considerable de run-up. Para el perfil 14 se pasa de tener un nivel de run-up -0.59 m a uno de +0.03 m; En el perfil 1: de -0.31 m a +0.15 m; y en el perfil 2: de -0.17 m a +0.20 m. Con un aumento de periodo de 10 segundos, la subida que experimenta el nivel de run-up es de aproximadamente +50 cm.

Por otro lado, en los resultados mostrados no se experimentan cambios en lo que respecta a la tasa instantánea de rebase para ninguno de los tres perfiles. No obstante, como se ha visto anteriormente, al aumentar el nivel del mar, probablemente al combinar periodos largos con altos niveles de mar, sí existan diferencias en relación al rebase, ya que el aumento de run-up señalado en el párrafo previo es un crecimiento relevante.

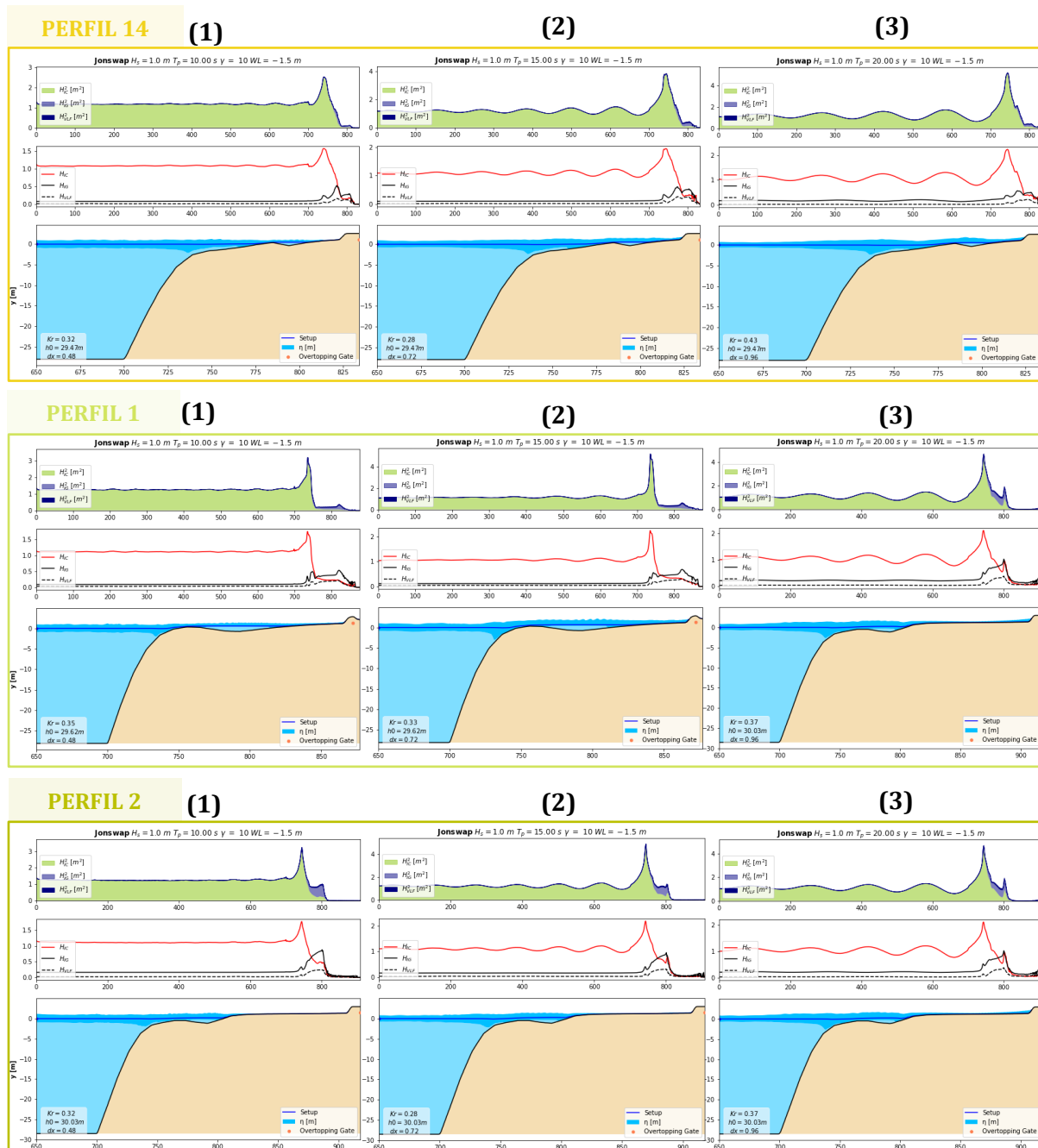


Figura 21. Análisis comparativo – Resultados de las series de nivel del mar, run-up (Ru2%) y rebase, para los perfiles 14, 1 y 2, sometidos a las mismas condiciones de oleaje, exceptuando el parámetro (1) $T_p = 10s$ vs (2) $T_p = 15s$ vs (3) $T_p = 20s$.

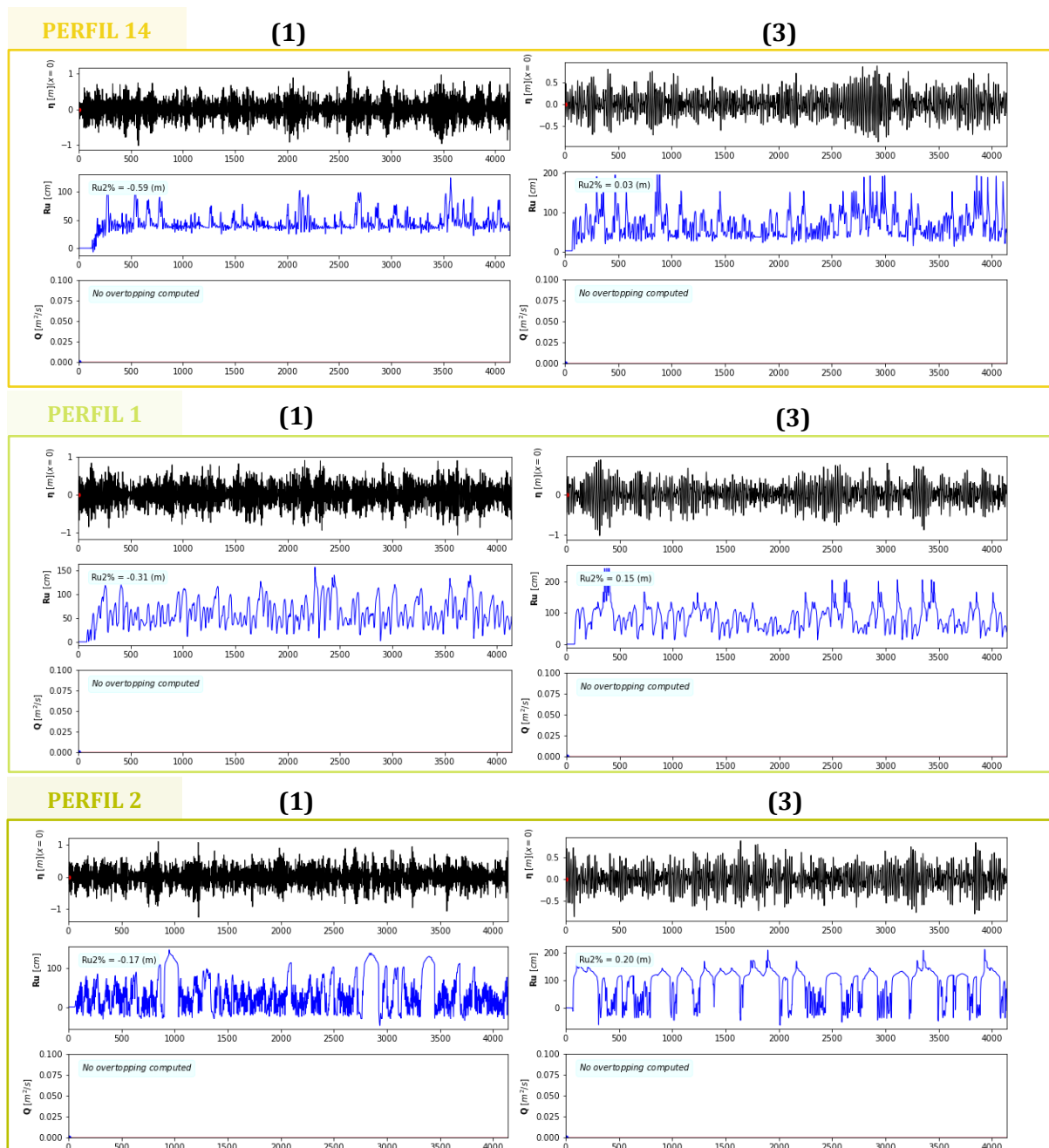


Figura 22. Análisis comparativo – Resultados de las series de nivel del mar, run-up ($Ru2\%$) y rebase, para los perfiles 14, 1 y 2, sometidos a las mismas condiciones de oleaje, exceptuando el parámetro (1) $T_p = 10s$ vs (3) $T_p = 20 s$.

3. Conclusiones

Para los casos aquí estudiados y en vista a los resultados y los comentarios realizados en el apartado anterior, se llegan finalmente a las siguientes conclusiones acerca de la propagación del oleaje sobre los perfiles con arrecifes de coral seleccionados:

Un aumento del nivel del mar produce:

- Una rotura del oleaje más progresiva. La energía se va disipando más suavemente al disponer de una lámina de agua sobre la plataforma coralina.
- Una disminución del coeficiente de reflexión en el perfil.
- Un aumento significativo del nivel de run-up. Al pasar de nivel del mar de -1.5 m a 0 m, se experimenta un incremento de 1 m en el parámetro de $Ru2\%$.
- La tasa instantánea de rebase aumenta considerablemente como consecuencia directa del aumento del nivel del mar, que produce aumento de run-up.

Un aumento en la velocidad del viento produce:

- Un aumento de altura de ola de 10 cm.
- Un aumento de $Ru2\%$ de 10 cm.

Un aumento en la altura de ola significativa produce:

- Un aumento de la energía del oleaje entre un 30 % y un 50 % en función del tipo de perfil analizado.
- Que la rotura del oleaje se produzca unos metros antes (50 m aprox.) sobre el perfil que aquellas olas con menor altura y la disipación de energía durante el proceso de rotura varíe significativamente en función de la batimetría.
- El perfil se vuelva cada vez menos reflejante para perfiles con plataforma coralina de más de 200 m de anchura.
- Un aumento del run-up en torno a 0.80 m y, por tanto, un aumento significativo de la tasa instantánea de rebase.

Un aumento en el periodo pico produce:

- Un aumento significativo de la altura de ola alrededor de 0.50 m para los tres perfiles analizados y, por tanto, de la energía del oleaje.
- Una subida del nivel de run-up de aproximadamente +50 cm, al aumentar 10 s el periodo.

METODOLOGÍA.

En este apartado se desarrolla en detalle la metodología propuesta para la determinación de la operatividad en el Aeropuerto Internacional de Majuro.

La metodología se distingue principalmente en 2 FASES:

- (1) Pre - procesado de datos.
- (2) Desarrollo del hindcast híbrido de propagación de oleaje.

Y un objetivo final:

- (3) Determinación de la operatividad en el aeropuerto de Majuro.

Cada una de estas fases se compone a su vez de una serie de apartados, siguiendo el esquema que se muestra a continuación (Figura 23).



Figura 23. Esquema que muestra la metodología propuesta para determinar la operatividad en el Aeropuerto de Majuro.

1. Análisis del clima marítimo.

En primer lugar, se ha realizado un primer estudio comparativo (Figura 24) con motivo de conocer las relaciones existentes entre los principales parámetros que condicionan el comportamiento del clima marítimo en la zona, es decir, las alturas de ola (H_s), periodo pico (T_p) y dirección media (θ).

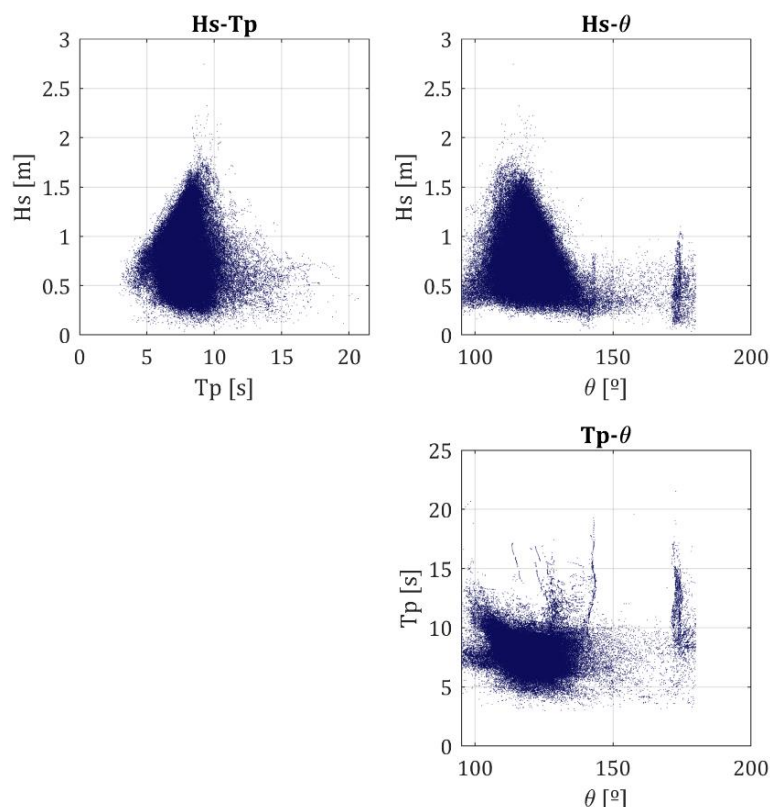


Figura 24. Análisis comparativo de los parámetros de oleaje.

Como primera observación, se puede señalar que para las mayores alturas de ola (olas de incluso hasta 3 m de altura), los periodos se encuentran en un rango relativamente reducido, en torno a los 10 segundos, mientras que aquellas olas de menor altura (0-1 m), los periodos abarcan un amplio rango, desde un mínimo de 2.75 s, hasta un máximo de 22.40 s.

Por otro lado, se observa cómo las olas de mayor altura proceden de un sector direccional bastante limitado ($\sim 10^\circ$), con direcciones próximas a los 120° , mientras que aquellas olas asociadas a alturas de menos de 1 m de altura, su rango de procedencia se amplía nuevamente, en este caso lo hacen en un rango direccional de 95° hasta los 180° .

2. Estudio de la información topo-batimétrica disponible y selección de los perfiles representativos de la zona de estudio.

El segundo paso ha sido estudiar la información topo-batimétrica de la zona para poder disponer de una idea generalizada de la topografía referente a los distintos perfiles coralinos que conforman la zona concreta del aeropuerto de Majuro.

El aeropuerto internacional de Majuro cuenta con una pista de dimensiones 2407x45 m. En el análisis, se han incluido dos tramos de acceso al mismo, trabajando con una longitud final de 3400 m.

Haciendo uso de la herramienta *QGIS*, junto con *Google Earth Pro* para la obtención de las coordenadas correspondientes deseadas, y la capa ráster, se han obtenido los perfiles del terreno cada 200 m aproximadamente, dando lugar a un total de 17 perfiles para caracterizar la zona del aeropuerto.

A modo de ejemplo, se muestra la obtención del perfil 1 (P1, en la Figura 25).

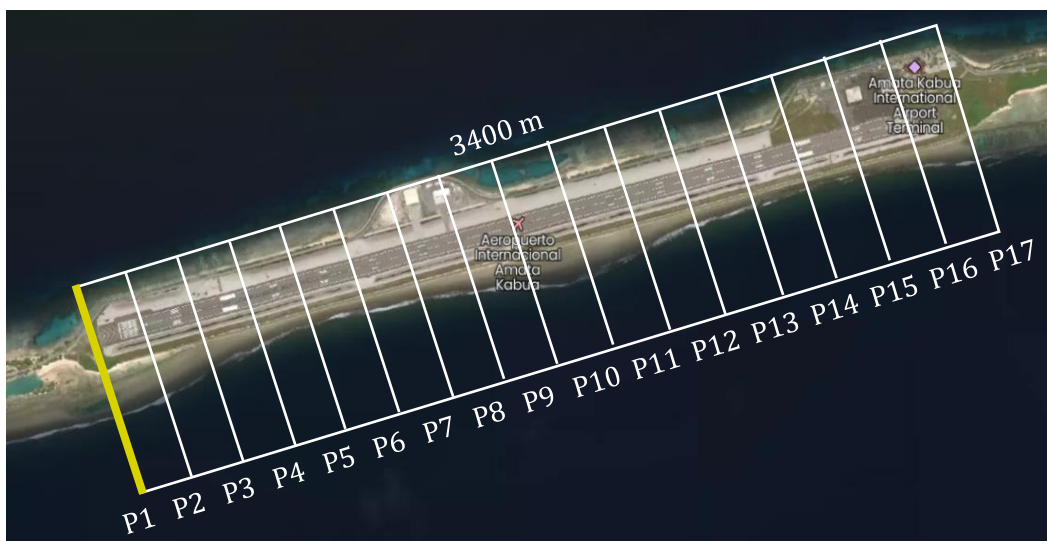


Figura 25. Ubicación de los 17 perfiles seleccionados para caracterizar el comportamiento de los mismos ante condiciones climáticas adversas en la zona del Aeropuerto Internacional Amata Kabua

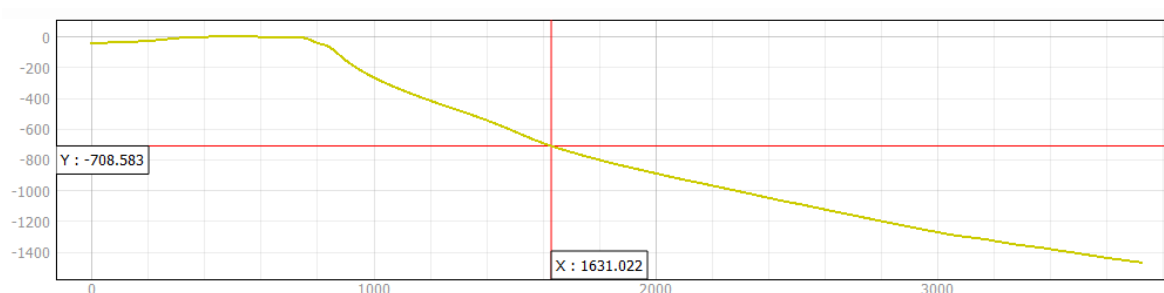


Figura 26. Ejemplo de la extracción de la información topo-batimétrica de la base de datos con ficheros tipo ráster, correspondiente al perfil 1 (P1).

Una vez hallados todos los perfiles, se ha procesado la información topo-batimétrica extraída para que cumplan los siguientes requisitos:

1. Todos los puntos que definen el perfil se han referido a un mismo eje local, establecido previamente. Dicho eje ha sido escogido como el punto de corte del perfil con el nivel medio del mar (0 m) para el perfil 1.
2. Se han acotado los perfiles para que el pie del arrecife comience a cota -30 m. Por su parte, la cota de playa se ha obtenido seleccionando la máxima altitud de cada perfil en los 10 m hacia tierra a partir del corte con el nivel medio del mar. Esta decisión ha sido tomada debido a que la variación que presentaba la topografía del terreno era mínima (<0.01 m).

De esta manera, los perfiles se podrán comparar entre sí, pudiendo observar con mayor claridad las diferencias y similitudes que presentan.

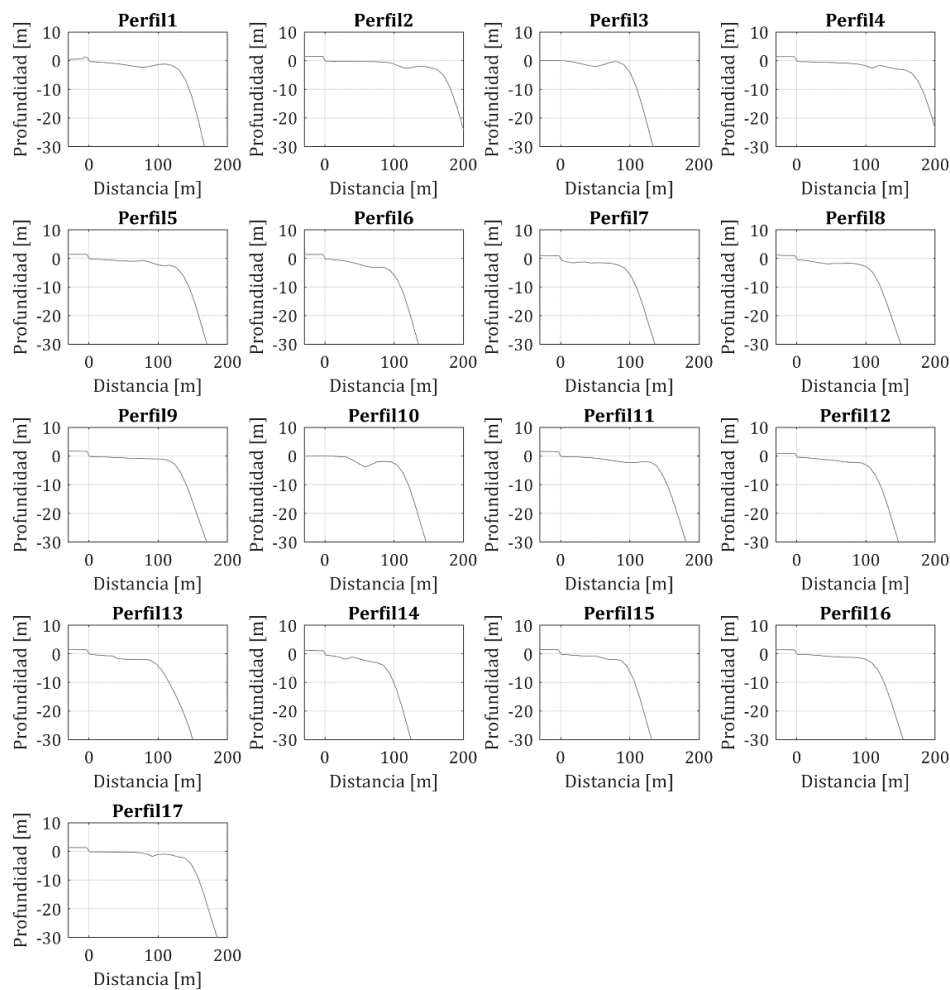
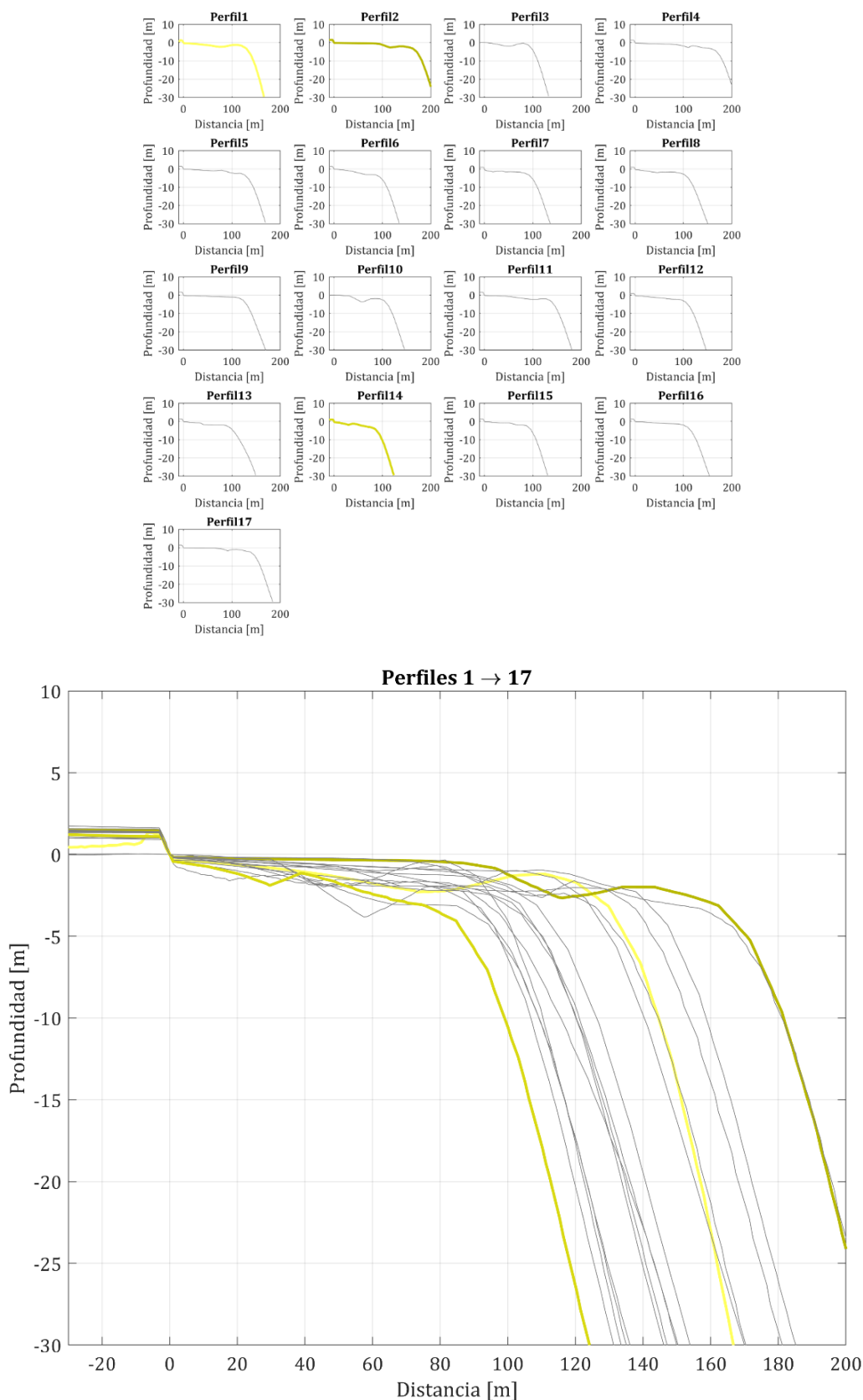


Figura 27. Representación gráfica de los perfiles topo-batimétricos (perfiles 1-17) obtenidos a lo largo del Aeropuerto Internacional Amata Kabua, Atolón de Majuro.

En la Figura 27 se observa como los perfiles seleccionados tienen una longitud aproximada de 210 m para el tramo de profundidad desde 30 m, y altitud máxima de 1.40 m. Además, comparten rasgos característicos comunes como son la plataforma horizontal desde donde comienza el arrecife de coral: desde los 0 m en adelante en el eje x, aunque discrepan notablemente en su anchura; y el valor de la pendiente tan pronunciada de la plataforma continental.

A simple vista, en los gráficos anteriores, se puede observar que la topografía que siguen todos los perfiles resulta semejante entre sí: una zona horizontal sobre el nivel del mar, una leve pendiente seguida de una plataforma que conforma el inicio del arrecife de coral, y por último una pendiente muy pronunciada, muy similar en todos los perfiles. Por tanto, con el objetivo de reducir el número de perfiles a analizar, se ha decidido seleccionar únicamente 3 perfiles que sean característicos o representativos de la zona en cuestión. Para ello, se han seleccionado 3 perfiles que incluyan toda la variabilidad del ancho del arrecife de los 17 perfiles representativos:

1. Más ancha (**Perfil 2**): 205 m.
2. Intermedia (**Perfil 1**): 165 m.
3. Más estrecha (**Perfil 14**): 125 m.



3. Propagación del oleaje a profundidades reducidas.

Para poder conocer el comportamiento de los distintos perfiles representativos de la zona de estudio frente a las condiciones de oleaje, se necesita disponer de dichas condiciones en un punto cercano a la costa.

El punto en el cual se dispone inicialmente el *hindcast híbrido* de oleaje se encuentra a una distancia 1045 m de costa, a una profundidad de dicho punto es de 520 m.

Los perfiles representativos de la zona tienen una pendiente muy pronunciada. Este hecho supone que, al intentar simular los procesos propios de la propagación de oleaje, en particular la refracción, el modelo no logre representar fielmente lo que ocurre en la realidad.

El fenómeno de la refracción tiene lugar cuando un tren de ondas que incide oblicuamente sobre la costa se encuentra con un cambio de profundidad. Una parte del frente de la onda viaja en aguas más someras que el resto de la cresta, con una consiguiente reducción en la velocidad de propagación, lo cual produce el giro del frente.

En este caso particular, al producirse ese cambio de profundidad mencionado de manera tan abrupta, el modelo hidrodinámico de propagación SWAN del cual se alimenta el metamodelo híbrido expuesto en este trabajo, presenta una serie de dificultades a la hora de simular dicho proceso adecuadamente.

Esto es debido a que el modelo resuelve las ecuaciones de teoría lineal de ondas en cada una de las celdas que componen el mallado de cálculo final del perfil. Para su resolución, la batimetría se interpola a la resolución de la malla. Dado que esta resolución no logra captar los cambios bruscos de profundidad en la batimetría, no se produce una refracción suave del frente de ondas; siendo preferible propagar por Snell asumiendo batimetría recta y paralela.

Además, gracias a la información topo-batimétrica proporcionada en el área de estudio, se llega a la conclusión de que la batimetría de la zona puede asumirse recta y paralela a costa. Por otro lado, la orientación de los perfiles respecto a la dirección de la costa puede admitirse similar en todos los casos, debido a que la variación direccional entre los mismos se encuentra del orden próximo a los 5°.

Por estos motivos, se ha realizado la propagación del oleaje desde el punto *hindcast de oleaje* hasta una profundidad de 30 m (aguas reducidas), aplicando la Ley de Snell junto con la Teoría lineal de ondas.

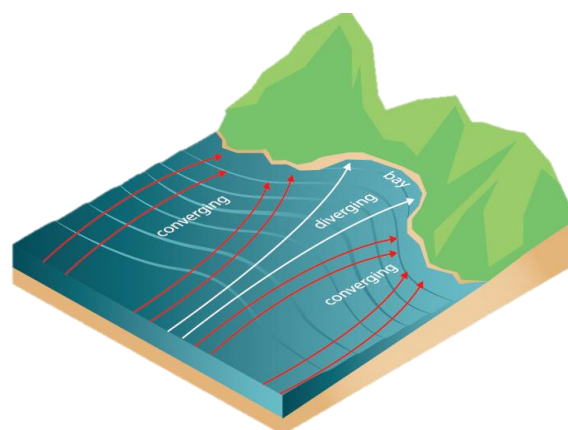


Figura 29. Esquema gráfico de los procesos de transformación que sufre el oleaje durante la propagación hacia la línea de costa. [Fuente: University of Hawái.]

$$\text{Ley de Snell: } k \sin \theta = cte \Rightarrow \frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2} = cte$$

$$\text{Teoría lineal: } \frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0} \cos \theta_0}{C_{g1} \cos \theta_1}}$$

Siendo:

k el número de onda, correspondiente a la expresión:

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Donde L es la longitud de ondas y se ha calculado mediante la ecuación de dispersión de ondas:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_0}\right)$$

Siendo:

g la aceleración de la gravedad [m2/s]

T el periodo pico del oleaje [s]

h la profundidad a la que se propaga la onda en aguas reducidas [m]

L₀ la longitud de ondas en profundidades indefinidas, calculada como:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$$

θ₀ y **θ₁** el ángulo que forma la dirección del tren de olas inicial y final, respectivamente, con la dirección perpendicular a la línea de costa.

En primer lugar, se ha realizado una primera selección de los oleajes que se encuentran dentro del rango direccional del E al W, es decir, la mitad sur. Por tanto, todos los oleajes que provienen de la mitad norte se descartan de la base de datos a propagar, puesto que ninguno de ellos afectará al aeropuerto.

Por otro lado, la ecuación de Snell realmente proporciona el ángulo final de propagación, es decir, **θ₁**, ya que inicialmente se disponen del resto de datos necesarios para la resolución de la expresión. El ángulo de incidencia del oleaje en el punto del *hindcast* es un dato conocido previamente, por lo que para hallar el **θ₀**, en primer lugar, se debe conocer el ángulo que forma la perpendicular a la zona costera donde está ubicado el aeropuerto de Majuro con respecto al norte. Este ángulo es de 166°, tal como se muestra en la Figura 30.

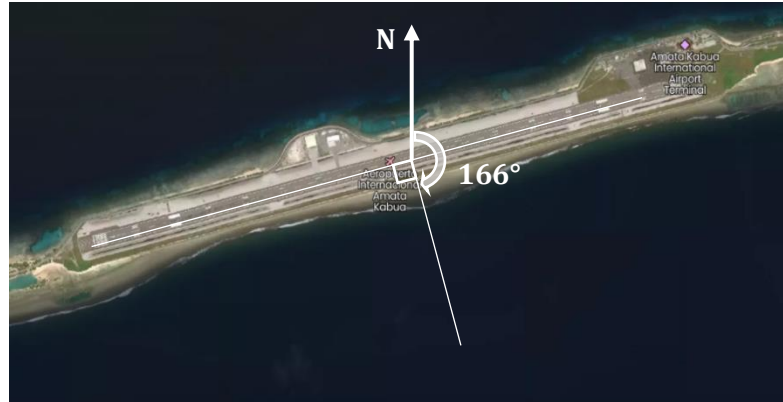


Figura 30. Orientación del Aeropuerto Internacional de Amata Kabua respecto al norte.

Por lo tanto, tenemos que:

$$\text{Si } \theta \leq 166^\circ \rightarrow \theta_0 = 166^\circ - \theta$$

$$\text{Si } \theta > 166^\circ \rightarrow \theta_0 = \theta - 166^\circ$$

Siendo θ el ángulo incidente del tren de ondas inicial en el punto del *hindcast*.

C_1 y C_2 las celeridades de onda [m/s] correspondientes al tren de ondas inicial y final, respectivamente, correspondiendo con las expresiones:

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi}$$

$$C_1 = \sqrt{gh}$$

H_1 la altura de ola final [m]

H_0 la altura de ola inicial [m]

C_{g0} y C_{g1} las celeridades del grupo de olas [m/s], en profundidades indefinidas y reducidas, respectivamente, correspondiente con las siguientes expresiones:

$$C_{g0} = \frac{C_0}{2}$$

$$C_{g1} = C_{g0}$$

Tras aplicar estas expresiones, se obtienen finalmente los datos propagados a 30 m de profundidad.

A continuación, se muestran a modo comparativo dos gráficos en los que se puede observar por un lado los datos de altura de ola iniciales (*hindcast*) en color oscuro frente a los propagados en color claro, seguido de los datos de dirección del oleaje inicial (*hindcast*) frente a las direcciones propagadas, nuevamente en color oscuro y claro, respectivamente.

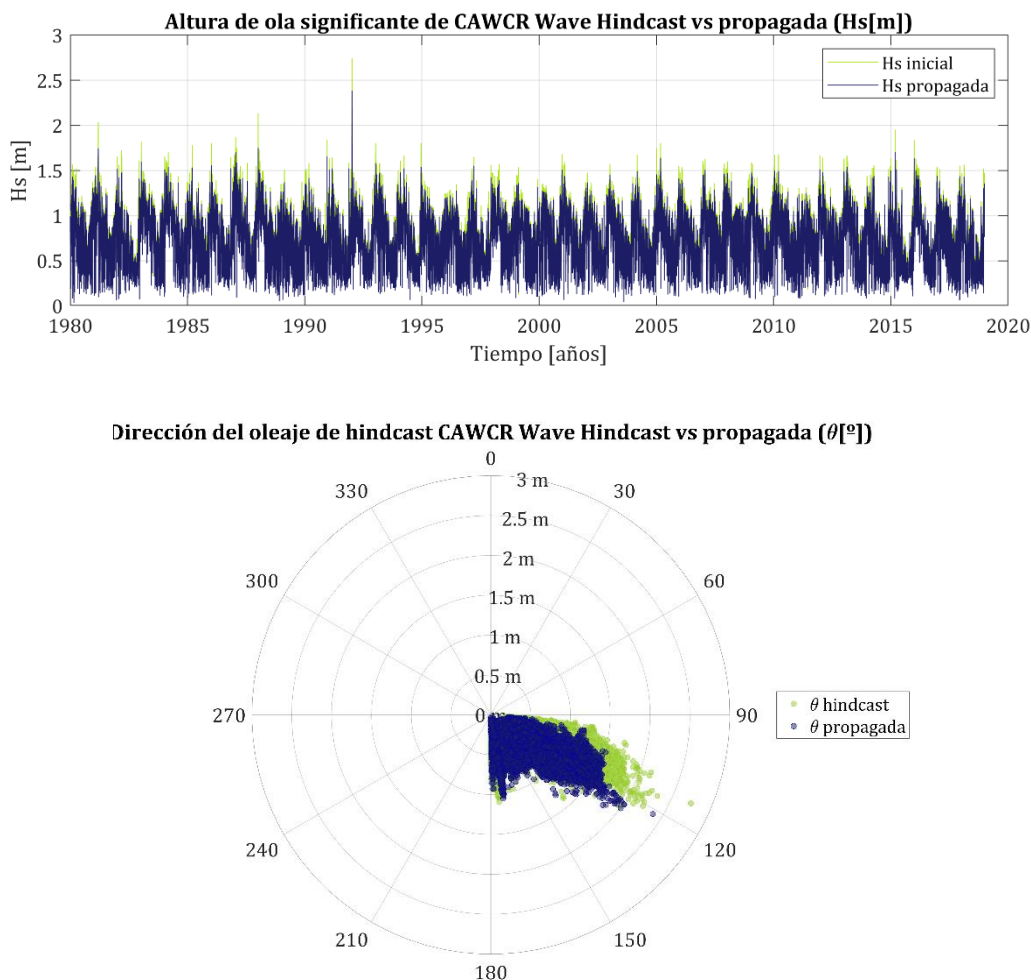


Figura 31. Representación gráfica de las alturas de ola iniciales

A partir de estos gráficos se puede establecer que:

- (1) El oleaje disminuye su altura de ola a medida que se aproxima a la zona costera. Desde una profundidad de 520 a una de 30, ha disminuido la altura de ola un 5% de media por lo que el proceso de refracción gana al de asomeramiento.
- (2) Se observa un ligero desplazamiento en lo que respecta al ángulo de incidencia del oleaje, debido al proceso de refracción que sufre el mismo en su proceso de propagación.

4. Selección y clasificación de oleajes representativos (MDA)

El escenario ideal para poder estudiar el comportamiento de los perfiles coralinos frente a las condiciones del clima marítimo sería poder propagar todos los estados de mar de la base de datos *hindcast* hasta el pie de playa. El alto coste computacional que supondría simular todos los estados de mar hace necesario emplear técnicas de lo que se conoce como *minería de datos* utilizando técnicas de clasificación y selección. Estas técnicas permiten seleccionar dentro de la base de datos, un número M de estados de mar considerados como representativos de la zona, permitiendo de esta manera caracterizar el clima marítimo del área en cuestión. El algoritmo empleado ha sido el MDA (*Maximun Dissimilarity Algorith*) desarrollado en detalle en el trabajo de Camus et al.2011. *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate*

wave climate], como la mejor opción para representar el conjunto de estados de mar incluyendo los máximos.

Esta técnica consiste en aplicar un algoritmo a través del cual, partiendo de una base de datos dada $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, consistente en vectores N de n -dimensiones, se obtiene un subconjunto de M vectores $\{v_1, \dots, v_M\}$ representativos de los datos originales. La selección comienza iniciando el subgrupo M escogiendo un vector de la muestra de datos inicial $\{v_1\}$. Este vector, en oleaje será el estado de mar parametrizado más disímil. El resto de elementos del subgrupo M se irán seleccionando de manera iterativa, de tal manera que en cada paso del algoritmo se irá calculando la disimilitud existente entre cada dato restante de la base de datos y el elemento del vector anterior dentro del subgrupo ($\{v_1\}$ en caso de la primera iteración), transfiriendo el dato que muestre una mayor disimilitud al subgrupo. El algoritmo finaliza cuando alcanza las M iteraciones. Para considerar un espacio n -dimensional con los mismos ejes, primero se normalizan las variables, diferenciando entre variables escalares y direccionales. Las disimilitudes entre los puntos se calculan mediante la distancia euclídea y, por último, se deshace la normalización de las variables para volver al rango inicial.

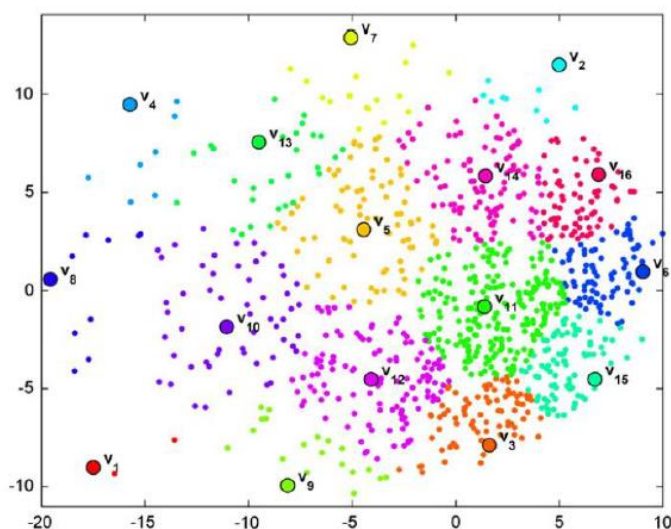


Figura 32. Ejemplo de selección de estados de mar representativos empleando el algoritmo de máxima disimilitud (MDA). [Fuente: Camus et al. 2011].

Al emplear el modelo 1D SWASH, las variables representativas obtenidas para caracterizar el oleaje serán H_s y T_p , y para el viento será W_x (velocidad del viento a 10 m de altura sobre el nivel del mar, proyectado en la dirección del eje x). La proyección del viento sobre el perfil se ha realizado considerando una orientación de la batimetría de 166° respecto al Norte.

Se han considerado 6 escenarios de nivel del mar, $\{-1.5, -0.5, 0.5, 1.5, 1.7 \text{ y } 2 \text{ m}\}$. Los cuatro primeros valores han sido establecidos en función de la información disponible de nivel del mar medio registrado por el mareógrafo de Majuro, mientras que los dos últimos han sido establecidos con el objetivo de predecir los efectos de la subida del nivel del mar como consecuencia del cambio climático. Con el MDA se han seleccionado 100 casos representativos $\{H_s, T_p, W_x\}$, los cuales se propagarán para cada nivel de mar definido, teniendo un total de 600 casos (Figura 33).

Finalmente, tras aplicar el algoritmo, se obtienen los 100 casos representativos de estados de mar para poder caracterizar el clima de la zona.

En la Figura 33 se señala la selección de los 100 casos frente a la base de datos de oleaje y viento utilizadas inicialmente.

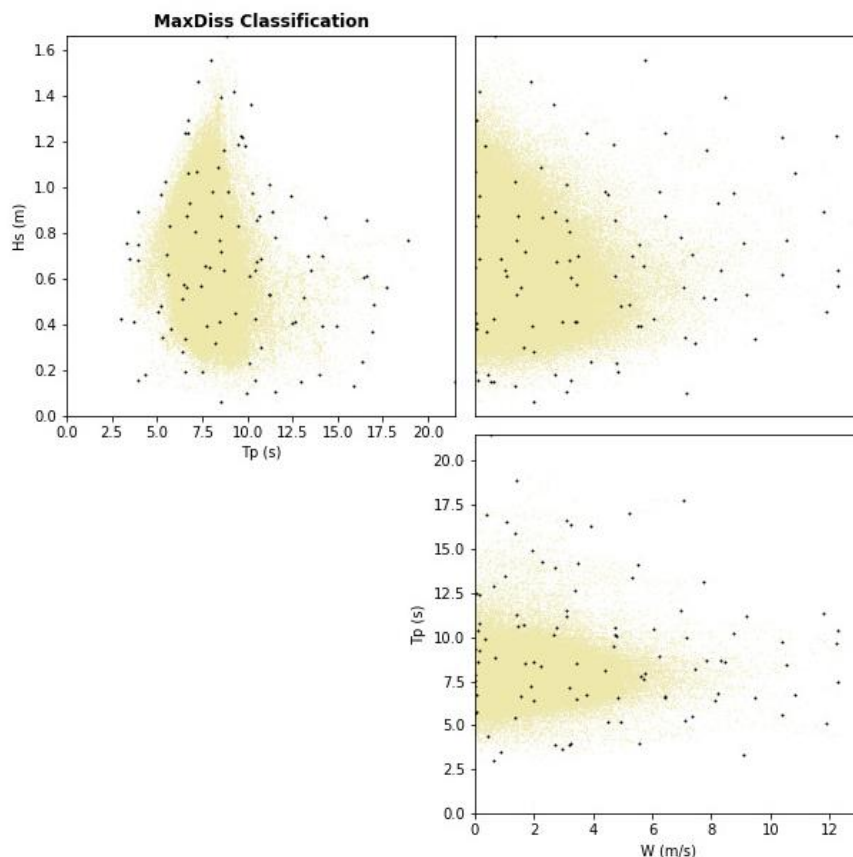


Figura 33. Selección de los 100 casos representativos de oleaje a propagar tras la aplicación del algoritmo MDA. En amarillo se presenta la base de datos completa, mientras que los puntos negros representan los casos seleccionados.

5. Aplicación del modelo hidrodinámico SWASH

Tras haber obtenido los estados de mar representativos del clima marítimo mediante la aplicación del MDA, se procede a realizar la simulación numérica de los N casos representativos aplicando el modelo hidrodinámico SWASH.

5.1 Inputs

Con carácter general, se debe introducir al modelo, por un lado, el perfil transversal del terreno, el nivel del mar, la fricción y el viento. Y, por otro lado, se han de establecer las condiciones de contorno. Además, se ha de generar la malla de cálculo para que se cumplan una serie de especificaciones de modelado numérico necesarias para la obtención de resultados admisibles.

El perfil transversal del terreno se ha procesado previamente con la ayuda de la herramienta Matlab2019, para poder introducirla directamente según los requisitos de SWASH (para más información, consultar el manual de uso).

En cuanto al nivel del mar, se ha forzado el modelo con la base de datos de nivel medio del mar que se dispone como dato de partida. Y la fricción del fondo, al no disponer de información relativa a los parámetros necesarios para el cálculo del parámetro de fricción, se ha considerado un valor

constante de 0.01 para todo el perfil, desde la cota -30 hasta el pie de playa (0 m). Este valor ha sido tomado por recomendación de los tutores de este trabajo en base a su vasta experiencia trabajando con perfiles de coral.

Por último, la malla ha sido generada a través de los siguientes parámetros:

- Número de nodos por longitud de onda. Este parámetro fija la resolución de la malla para el número de nodos deseados por longitud de onda en 1 m de profundidad (asumiendo que en la playa la columna de agua puede alcanzar 1 m de altura debido al desencadenamiento de la onda infragravitatoria). Se han definido 65 nodos por longitud de onda.
- El modelo permite la resolución de las ecuaciones en distintas capas en vertical, en este caso, se han resuelto con una única capa.
- El número de Courant del modelo se ha establecido mediante un paso de tiempo ajustado de manera dinámica, por un rango de número de Courant de 0.1-0.5.

5.2 Condiciones de contorno

El modelo hidrodinámico SWASH admite que las condiciones de contorno de la malla de cálculo sean tierra, playa o agua. Las condiciones del oleaje se imponen desde la zona oeste del dominio numérico, por lo que la propagación se efectúa de izquierda a derecha. Esta imposición hace que el modelo numérico considere como agua el contorno izquierdo y tierra el contorno derecho. Además, para efectuar la simulación del oleaje sin que se produzca reflexión en el contorno donde se sitúa el generador de oleaje (margen izquierdo), se adopta un contorno muy poco reflejante.

En lo que respecta a la generación del oleaje, al estar trabajando en una dimensión (1D), el tren de ondas se simula mediante un espectro Jonswap, con un parámetro $\gamma=10$, ya que los oleajes característicos de la zona son de tipo *swell* o mar de fondo [Ford et al. 2018].

Joint North Sea Wave Project 1968 y 1969 (JONSWAP) Hasselmann et al. (1973) OPD:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4}} \gamma^\delta$$

Donde:

$S(\omega)$ representa la energía del espectro en función de la frecuencia angular.

α es el parámetro de escala, que depende de gamma (γ), y cuya expresión corresponde a:

$$\alpha \cong \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}}$$

g es la aceleración de la gravedad [m/s²]

ω es la frecuencia angular [rad]

γ es el factor de apuntamiento, es el parámetro de forma que controla la agudeza del pico del espectro.

5.3 Outputs

Para la obtención de las variables de salida se han dispuesto una serie de sensores a lo largo de la malla de cálculo. Estos sensores se han dispuesto cada 5 m y en cada uno de ellos se ha obtenido la serie de superficie libre en cada instante.

Además, se han obtenido tanto la tasa de rebase instantánea [m³/s/m] como el run-up, para un último aparato de medida situado en el punto de máxima altitud del perfil.

6. Reconstrucción histórica del hindcast (RBF)

Los resultados del oleaje propagado, obtenidos mediante la utilización del modelo hidrodinámico SWASH, corresponden a los 600 casos propagados relativos a los 100 estados de mar representativos para los 6 niveles de mar obtenidos a través del algoritmo MDA. Para poder conocer los valores de los parámetros del oleaje propagados de los casos restantes de la base de datos, se procede a la reconstrucción histórica de la serie de hindcast.

La reconstrucción histórica de la serie se lleva a cabo mediante una técnica de interpolación numérica basada en funciones de base radial (*Radial Basis Functions* (RBF)). La aproximación mediante esta técnica ha sido utilizada satisfactoriamente en numerosos campos, y normalmente se obtienen resultados mucho mejores que empleando otras técnicas conocidas [Camus et al. 2011].

Tomando como base M puntos dispersos en un espacio de dimensión n $\{x_0, \dots, x_M\}$ y sus valores asociados en una función real $\{f_1, \dots, f_M\}$, siendo $f_i = f(x_j)$, $j = 1, \dots, M$. El método de interpolación RBF consiste en extrapolar los valores asociados a los M puntos, hasta lograr obtener la función real $f = f(x)$. La función de aproximación se asume que tiene la siguiente forma:

$$RBF(x) = p(x) + \sum a_j \Phi(\|x - x_j\|) M_j = 1$$

donde Φ es la función de base radial, $\| \cdot \|$ es la norma euclidiana, $p(x)$ es la base monomial $\{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, formada por un número de monomios de grado 1 igual al número de dimensiones del *dataset* (n) y un monomio de grado 0, siendo $b = \{b_0, b_1, \dots, b_n\}$, los coeficientes de esos monomios. Los coeficientes del RBF a_j y los coeficientes de los monomios b , se obtienen aplicando las restricciones de la interpolación.

En las siguientes figuras (Figura 34, 35 y 36), se muestran una serie de gráficos en los cuales, los tres primeros corresponden a una serie realizada con los resultados de los parámetros del oleaje propagado (Hs y Tp) y viento (Wx), correspondientes a la totalidad de estados de mar representativos para cada nivel del mar (6 niveles, con 100 casos representativos cada uno).

El modelo hidrodinámico SWASH se fuerza mediante dichas series, obteniendo finalmente las siguientes dos filas de gráficos que se muestran en la figura. Haciendo referencia a los resultados obtenidos de las series de run-up (Ru2%) y los eventos de rebase (q), para cada nivel del mar en particular.

En primer lugar, se puede ver en la figuras (Figura 34, 35 y 36), cómo los parámetros empleados para realizar la interpolación se asemejan a los datos reales disponibles en la base de datos del

hindcast de oleaje y viento. En primer lugar, las alturas de ola toman valores entre 0.03 y 1.7; los periodos entre 2 y 25 s; y, por último, la velocidad del viento, entre los 0 m/s y los 15 m/s.

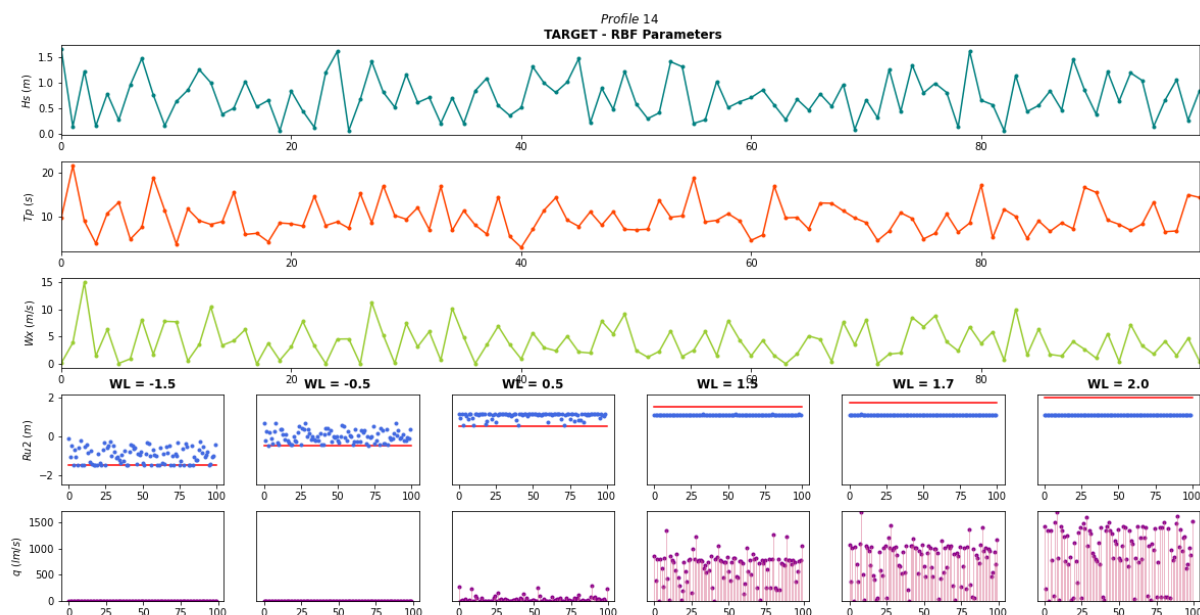


Figura 34. *Parámetros del oleaje propagado y viento para la reconstrucción histórica de las series de oleaje, viento, run-up (Ru2%) y rebase, para el perfil 14.*

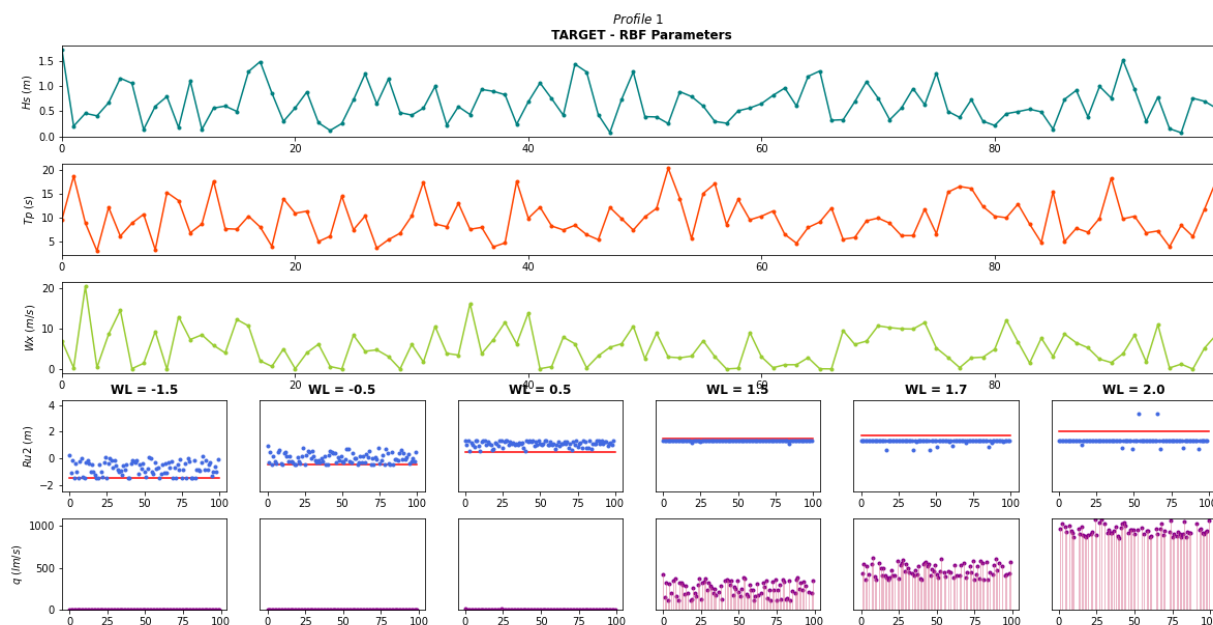


Figura 35. *Parámetros del oleaje propagado y viento para la reconstrucción histórica de las series de oleaje, viento, run-up (Ru2%) y rebase, obtenidos para cada perfil 1.*

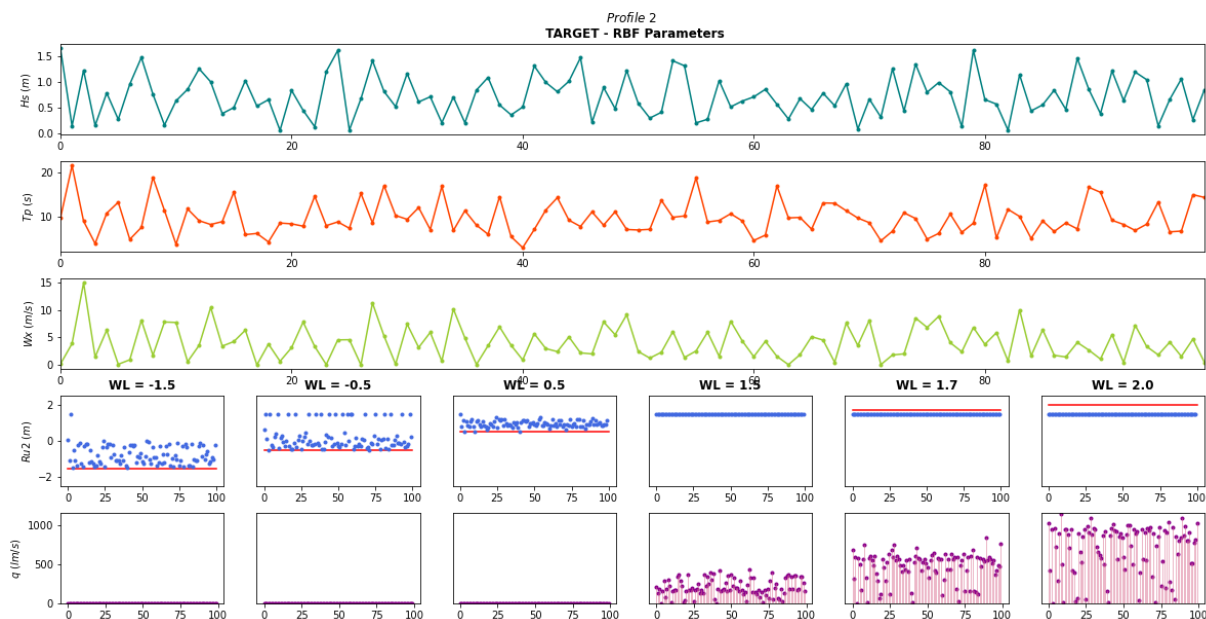


Figura 36. *Parámetros del oleaje propagado y viento para la reconstrucción histórica de las series de oleaje, viento, run-up (Ru2%) y rebase, obtenidos para cada perfil 2.*

Finalmente, se han obtenido las series de run-up del 2% (Figura 38) y tasa de caudal instantánea de rebase (Figura 39) reconstruidas, desde el año 1993 hasta el 2019, tal como se muestra a continuación:

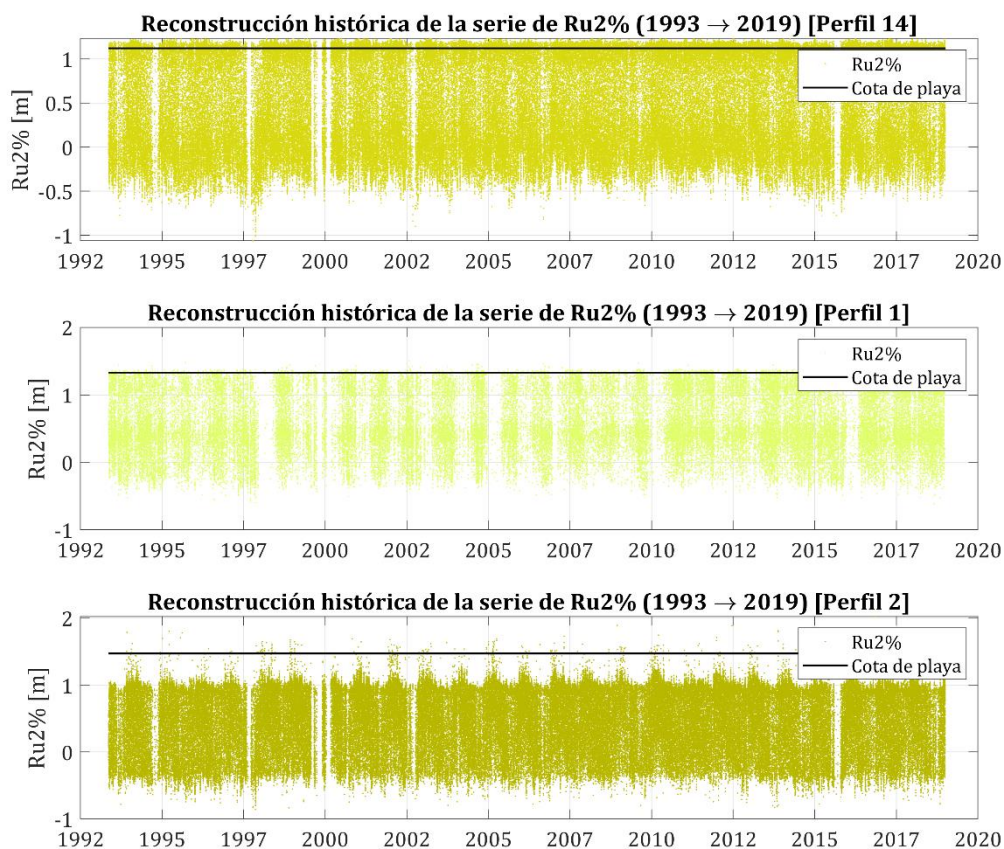


Figura 37. *Serie histórica de Ru2% reconstruida, desde 1993 hasta 2019.*

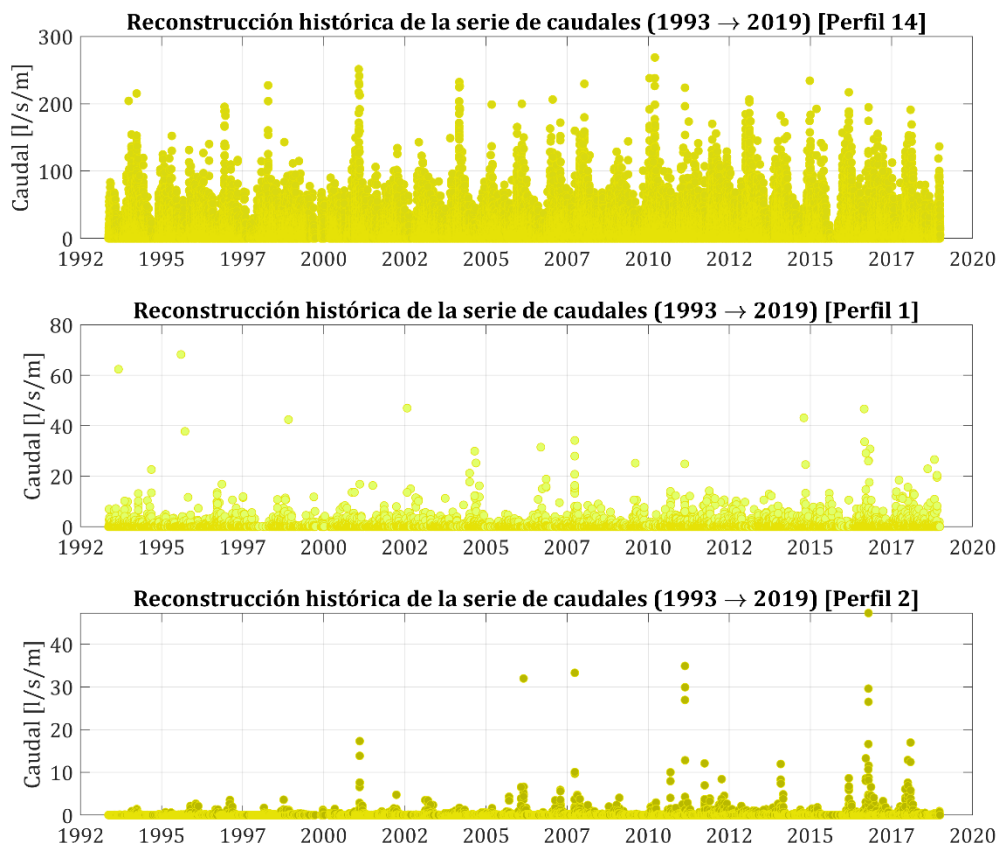


Figura 38. Serie histórica de la tasa instantánea de rebase reconstruida, desde 1993 hasta 2019.

Se observa en ambas figuras que tanto el nivel de run-up como la tasa instantánea de rebase es mayor para el perfil 14 y se observa una tendencia a disminuir cada vez más, a medida que se incrementa el ancho de la plataforma de coral.

Este hecho no es únicamente debido a la gran cantidad de energía que es capaz de disipar el perfil cuanto más anchura tiene la plataforma coralina, sino también a que la cota de coronación del perfil 14 es 35 cm más baja que la del perfil 2, y 18 cm más baja que la del perfil 1; siendo dicha cota:

1. Perfil 14 = 1.12 m.
2. Perfil 1 = 1.30 m.
3. Perfil 2 = 1.47 m.

DETERMINACIÓN DE LA OPERATIVIDAD EN EL AEROPUERTO DE MAJURO

Como se comentaba al principio de este trabajo, Majuro está constantemente azotado por los efectos del oleaje tipo swell que tienen lugar en el Océano Pacífico.

Desde el Pacífico Norte, los eventos de inundación han provocado graves y costosos impactos en la zona urbana de Majuro, concretamente a lo largo de la sección Este de la isla, donde se encuentra la capital (D.U.D), debido a que se trata de la zona más expuesta al mismo. Ocurre de manera similar en la zona sur del atolón, donde las olas generadas en el Pacífico Sur han inundado el litoral en al menos 4 ocasiones (junio 1994, junio 2013 y octubre 2014). El litoral sur de Majuro está mucho menos poblado que la zona donde se sitúa la capital; sin embargo, a lo largo del sur del atolón se sitúan infraestructuras críticas, incluyendo el aeropuerto, además de la estación de servicio y la fábrica de procesamiento de productos pesqueros [Ford et al 2018].

Tal como se ha visto en el análisis del clima en apartados anteriores, los oleajes presentan alturas de olas de altura relativamente reducida pero grandes periodos, esto es debido a que la fuente de generación en el Pacífico Sur se encuentra a kilómetros de distancia y, además, el atolón cuenta con la protección de los numerosos grupos de islas que se encuentran en la trayectoria del oleaje [Ford et al. 2018]. Sin embargo, es a causa de estos oleajes de poca altura y gran periodo que se dan las inundaciones registradas hasta día de hoy.

El aeropuerto está protegido mediante un revestimiento y un muro vertical, sin embargo, los eventos mencionados anteriormente los rebasaron provocando fuertes impactos en el mismo. El oleaje depositó sobre las infraestructuras aeroportuarias enormes cantidades de arena y grava, sobre todo encima de la pista de aterrizaje y despegue, lo que supuso una parada operativa en el Aeropuerto con motivo de recoger los destrozos. Se pueden ver algunas de las imágenes de lo sucedido en la Figura 39, [Ford et al. 2018].

En vista de la información histórica recopilada acerca de los eventos de inundación que causaron el cierre eventual del Aeropuerto Internacional de Majuro en el trabajo realizado por Ford et al. 2018, se posee una referencia fiable en lo que respecta a la fecha en la que ocurrieron los mismos, recogidas en la tabla 1.

Tabla 1. Recopilación de eventos históricos de inundación que dieron paso al cierre temporal del aeropuerto Internacional de Majuro. [Fuente: Ford et al., 2018]

Fecha de inicio	Máximo nivel del mar [m]	Hs [m]	Referencias
07/02/1993	1.10	3.10	<i>Record tide of 6.6 ft. (1993) Marshall Islands Journal, p 19</i>
08/06/1994	0.71	2.71	<i>FEMA declaration DR1040, Johnson (1994)</i>
24/06/2013	1.16	1.95	<i>Pope (2013), Johnson (2013)</i>
08/10/2014	1.06	N/A	<i>Southern edge of Majuro inundated with water (2014)</i>
21/01/2015	1.09	N/A	<i>Johnson (2015)</i>

Teniendo en cuenta la información expuesta en la tabla anterior, se ha realizado un análisis de la serie de eventos de rebase obtenida tras la aplicación de la metodología expuesta en este trabajo, con el objetivo de establecer un umbral a partir del cual el Aeropuerto de Majuro podría considerarse inoperativo en situaciones futuras.

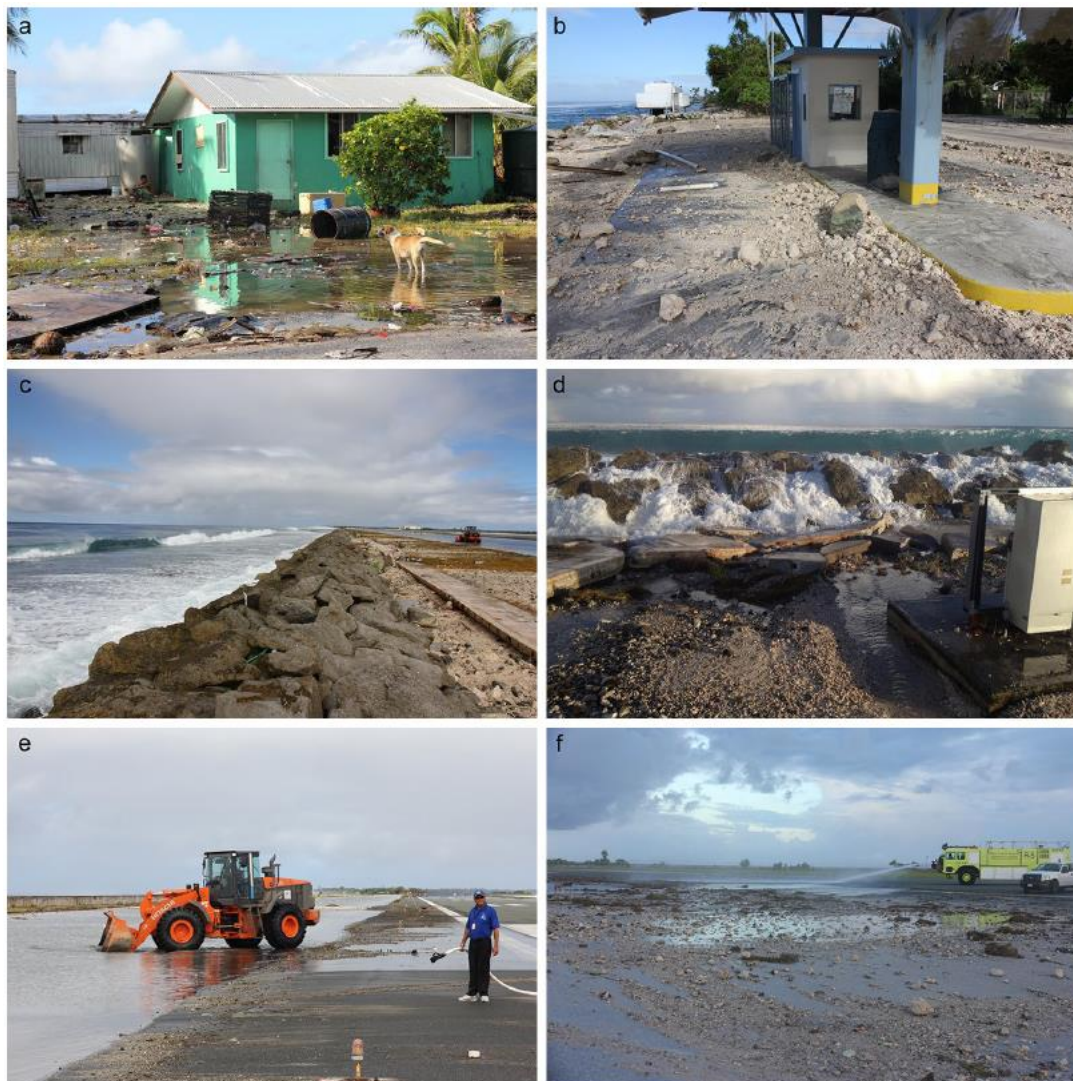


Figura 39. Imágenes de los daños sufridos en el sur de la isla como consecuencia del evento de inundación que tuvo lugar el día 26/06/2013: (a) agua estancada y una mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos encontrados en el sur del atolón; (b) arena, gravas y arrecifes de coral muertos, hallados en la zona sur del atolón; (c-d) daños sobre las protecciones costeras e imágenes de la inundación, en la zona del Aeropuerto Internacional de Majuro. [Fuente: Ford et al., 2018].

En la tabla 1 se recogen los eventos de mayor importancia según [Ford et al. 2018], sin embargo, la reconstrucción histórica tiene lugar a partir del día 14/07/1993, ya que inicialmente no se disponía de datos previos a dicha fecha de viento ni de nivel del mar. Por tanto, únicamente se han podido evaluar 3 eventos:

- Evento 1: 08/06/1994
- Evento 2: 24/06/2013
- Evento 3: 08/10/2014

Según los resultados obtenidos a través de este trabajo, los eventos 1, 2 y 3 han tenido las siguientes tasas de rebase en los perfiles 14, 1 y 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos tras la reconstrucción histórica de la serie de caudales de rebase en los perfiles 1, 1 y 2.

Evento	Rebase máximo obtenido [l/s/m]		
	Perfil 14	Perfil 1	Perfil 2
1	119.562	0.966	0.001
2	64.080	1.640	3.442
3	44.425	4.475	0.569

El perfil 14 es el que se encuentra más expuesto frente a eventos de inundación costera en la zona debido a que se trata del perfil que posee la plataforma coralina más estrecha de todos los perfiles que conforman el área longitudinal del aeropuerto y, por tanto, el que presenta una menor disipación de energía del oleaje incidente.

En las figuras 40, 41 y 42, se muestran las series de rebase acotadas a 72 horas antes y después del día concreto de ocurrencia de los eventos de inundación según (Ford et al., 2018), expuestos en la tabla 1, para cada uno de los perfiles, respectivamente. Se han señalado, además, las tasas de caudal instantáneas que suponen los máximos rebases en cada serie.

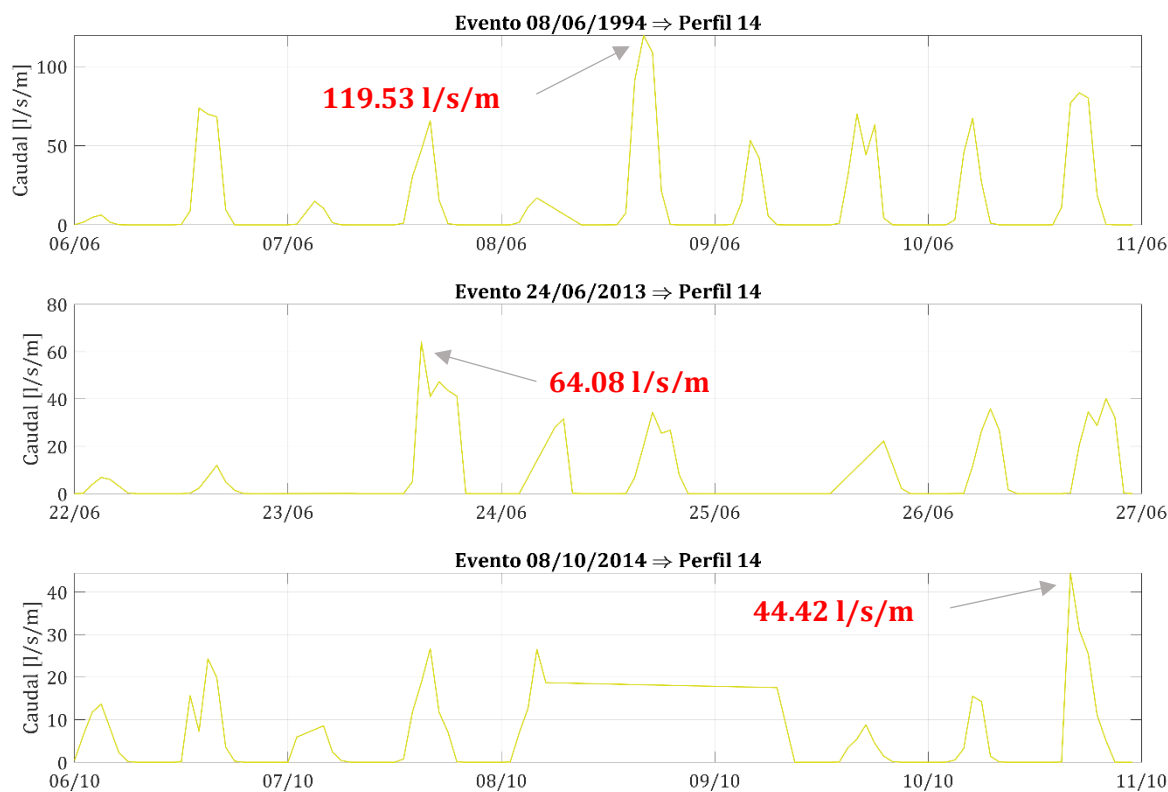


Figura 40. Representación gráfica de los eventos de rebase que tuvieron lugar en las inundaciones históricas registradas para los días 08/06/1994, 24/06/2013 y 08/10/2014, en el perfil 14.

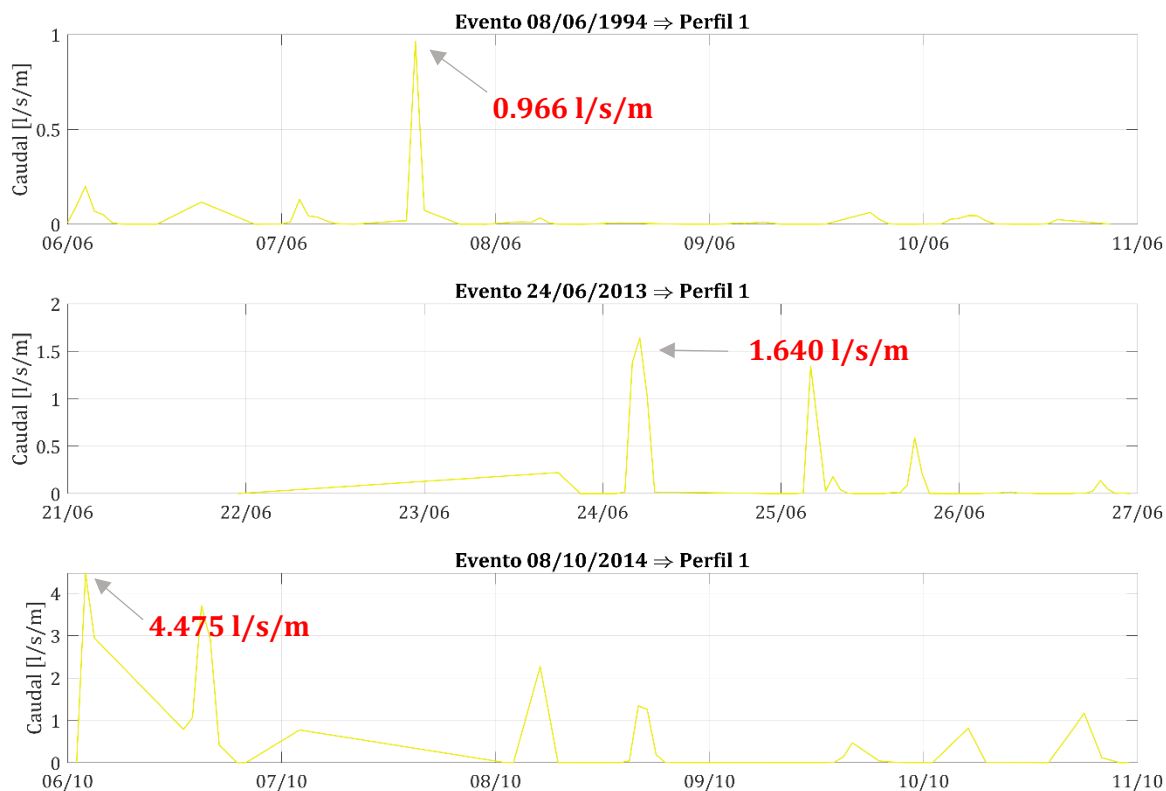


Figura 42. Representación gráfica de los eventos de rebase que tuvieron lugar en las inundaciones históricas registradas para los días 08/06/1994, 24/06/2013 y 08/10/2014, en el perfil 1.

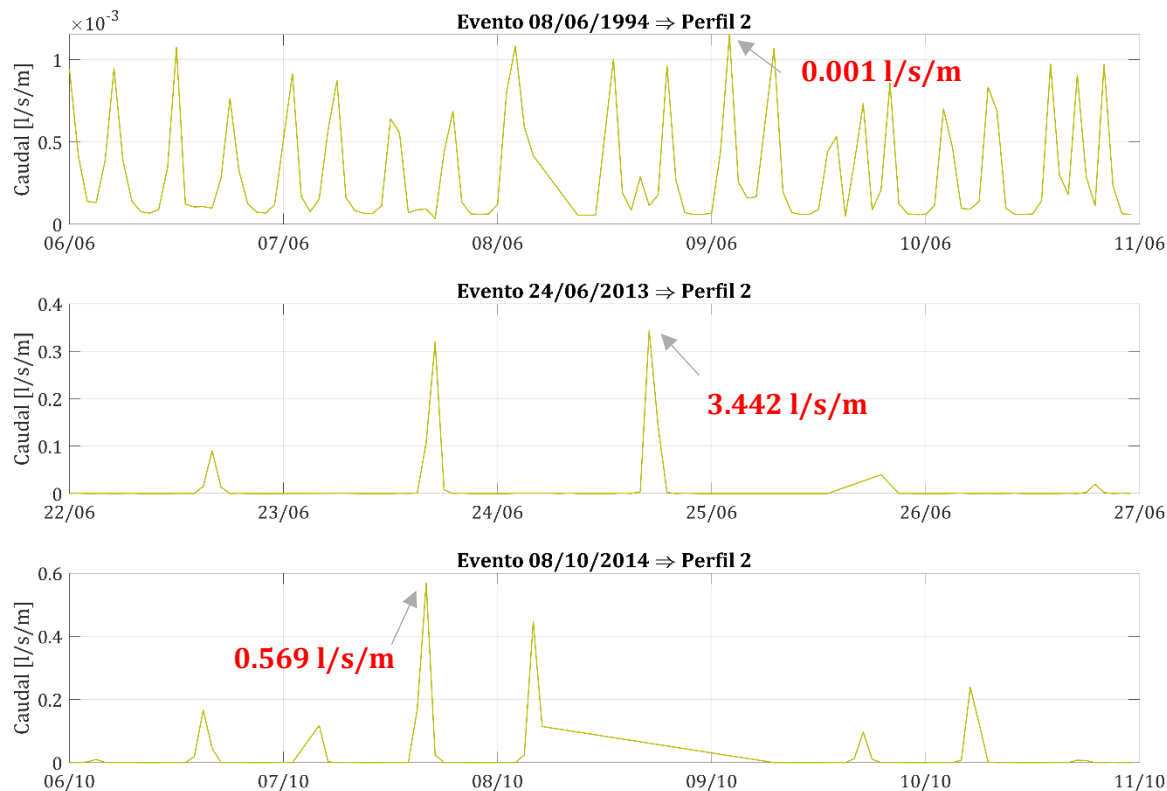


Figura 41. Representación gráfica de los eventos de rebase que tuvieron lugar en las inundaciones históricas registradas para los días 08/06/1994, 24/06/2013 y 08/10/2014, en el perfil 23.

Los resultados expuestos en estos gráficos muestran cómo el perfil 14 cuenta con las mayores tasas de rebase de los tres perfiles analizados; lo cual confirma lo expuesto en el párrafo anterior.

En conclusión, podría decirse que, cuanto mayor sea la plataforma de coral, mayor protección tendrá la zona frente a eventos de inundación; puesto que la plataforma coralina ofrece una barrera de defensa natural donde se produce una gran disipación de la energía del oleaje incidente y, por consiguiente, la tasa de rebase que pueda registrarse en zonas con gran plataforma de coral será muy reducida. Además, la cota del perfil 14 es la de menor altitud, por lo que la tasa de rebase será mayor. Del mismo modo que para zonas con perfiles similares al 14, cuyas anchuras de plataforma sean inferiores a los 160 m, el riesgo de inundación es alto. En la siguiente figura (Figura 43), se indican los perfiles cuyas plataformas coralinas tienen una cota del perfil y una anchura semejantes al perfil 14 (125 m), siendo estos: perfil 3 (132.5 m), perfil 6 (131.1 m), perfil 7 (135 m) y perfil 15 (130). Se señalan también las 3 áreas susceptibles a sufrir eventos de inundación similares a los obtenidos en el perfil 14.

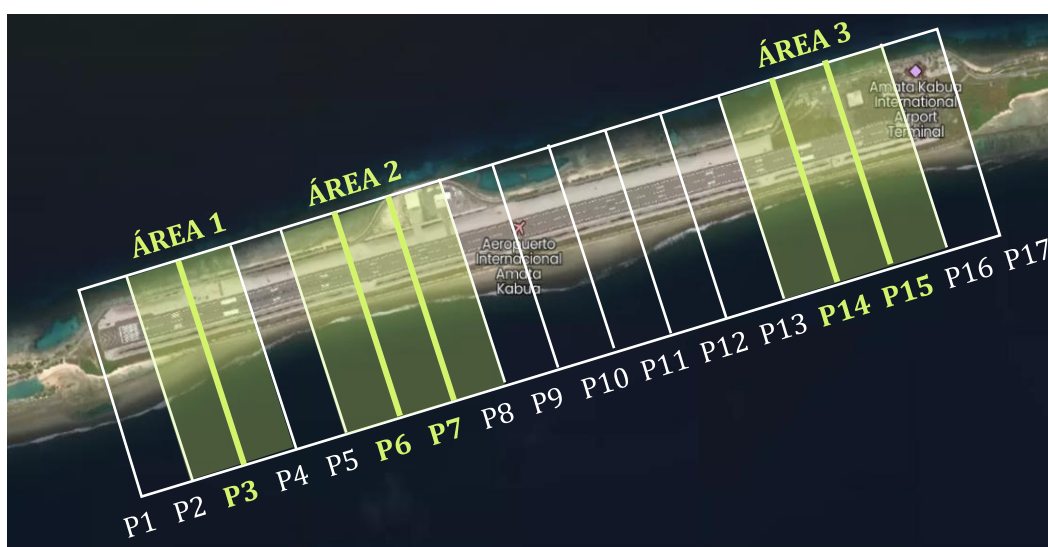


Figura 43. Áreas del Aeropuerto Internacional Amata Kabua susceptibles a sufrir eventos de inundación similares a los obtenidos para el perfil 14.

Tal como se explicaba anteriormente, los eventos de rebase seleccionados para analizar en este estudio son aquellos que han provocado la inoperatividad del Aeropuerto Internacional Amata Kabua. Por tanto, en base a estos resultados, se ha decidido establecer como umbral de operatividad el valor mínimo de las máximas tasas de rebase resultantes para cada evento en particular, obtenidos en cada uno de los perfiles, [Tabla 1].

La zona de mayor exposición frente a eventos de inundación es la representada mediante el perfil 14, es por este motivo que se ha tomado como umbral de referencia inicial de operatividad el valor de 44.42 l/s/m. Se conoce que la zona sur del atolón se encuentra protegida mediante infraestructuras de defensa como revestimientos y muros verticales [Ford et al. 2018], pero no se dispone de información real acerca de la cota de coronación del perfil a lo largo del tramo del aeropuerto. Realmente estos resultados son consecuencia de forzar al modelo hidrodinámico SWASH mediante unos perfiles cuya cota de coronación no superan el valor de 1.40 m, por lo que no se está teniendo en cuenta ningún tipo de elemento de defensa. Es por esta razón que, finalmente, se ha decidido escoger un valor umbral de operatividad de 55 l/s/m, y se cree que aún

sigue existiendo un margen bastante amplio en comparación con lo que sucedería en la realidad. Por ende, todos aquellos valores que se encuentren por encima de dicho umbral se considerarán como eventos que ocasionan la inoperatividad del Aeropuerto Internacional de Majuro.

En la siguiente figura (Figura 43), se muestran las series reconstruidas de rebase, desde 1993 hasta 2019, junto con el umbral de operatividad seleccionado. En ella se puede observar la cantidad de eventos que sobrepasan el umbral en el perfil 14 (3469, concretamente), mientras que en el perfil 1 únicamente lo hacen 2 eventos, y en el perfil 2, ninguno.

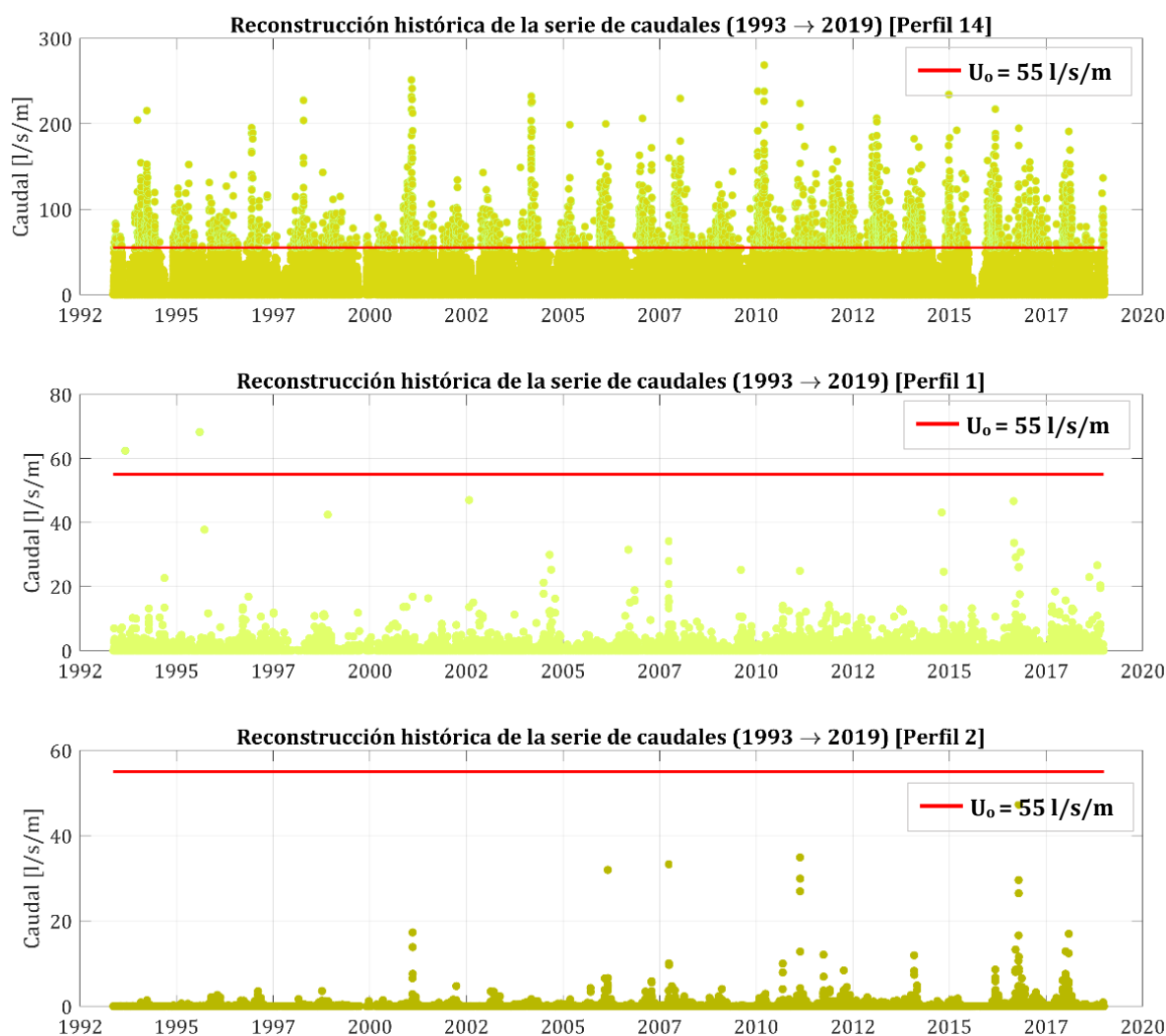


Figura 44. Umbral de operatividad para los perfiles 14, 1 y 2.

Estos resultados suponen que, por motivos eventos inundación causados por caudales de rebase superiores a los 55 l/s/m en el área 3, el Aeropuerto Internacional Amata Kabua no se encuentra operativo alrededor de 144 h/año, lo que supone un total de 6 días inoperativos anuales. De la misma manera, se puede deducir que para las áreas 1 y 2, los resultados de horas que el aeropuerto permanecería inoperativo sería algo menor (puesto que la plataforma coralina es algo más amplia), pero muy similar.

ANÁLISIS DE LA OPERATIVIDAD FRENTE A DISTINTOS ESCENARIOS DE AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

En este apartado se contempla la posibilidad de que la región de Majuro experimente una subida de nivel del mar a futuro; por lo que se ha realizado un análisis para conocer la respuesta de los tres tipos de perfiles ante 3 hipotéticos escenarios de aumento del nivel medio del mar:

- **Escenario 1:** aumento de 0.10 m.
- **Escenario 2:** aumento de 0.20 m.
- **Escenario 3:** aumento de 0.50 m.

Para analizar dichos casos, se ha aplicado nuevamente la metodología aquí explicada, aumentando los datos de nivel medio del mar con los valores indicados anteriormente para cada uno de los casos, y tomando nuevamente como umbral de operatividad el valor de 55 l/s/m.

Finalmente se han obtenido los resultados que se recogen en la tabla 3:

Tabla 3. Resultados del número de horas no operativas al año para los perfiles 14, 1 y 2 obtenidas tras el estudio de los distintos escenarios hipotéticos de subida de nivel medio del mar.

Perfil	Nº de horas no operativas/año		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
14	225.6 h	355.8 h	1126.3 h
1	0.9 h	0.9 h	236.5 h
2	0.7 h	4.4 h	196.2 h

Como se puede observar en los resultados de la tabla 3, para los tres escenarios propuestos, el perfil que se encuentra más expuesto es nuevamente el más vulnerable ante el aumento del nivel del mar. Por lo tanto, la situación pésima sería para el perfil 14, donde:

Escenario 1:

Un aumento del nivel del mar de 10 cm implicaría que el aeropuerto estuviese inoperativo un gran número de horas al año. Se estaría hablando de un total de **225.6 h** al año sin servicio. Lo que supone un total de aproximadamente **9.4 días** inoperativos al año.

Escenario 2:

Un aumento del nivel del mar de 20 cm implicaría que el aeropuerto estuviese inoperativo un gran número de horas al año. Se estaría hablando de un total de **355.8 h** al año sin servicio. Lo que supone un total de aproximadamente **15 días** inoperativos al año.

Escenario 3:

Un aumento del nivel del mar de 50 cm implicaría que el aeropuerto estuviese inoperativo un gran número de horas al año. Se estaría hablando de un total de **1126.3 h** al año sin servicio. Lo que supone un total de aproximadamente **47 días** inoperativos al año.

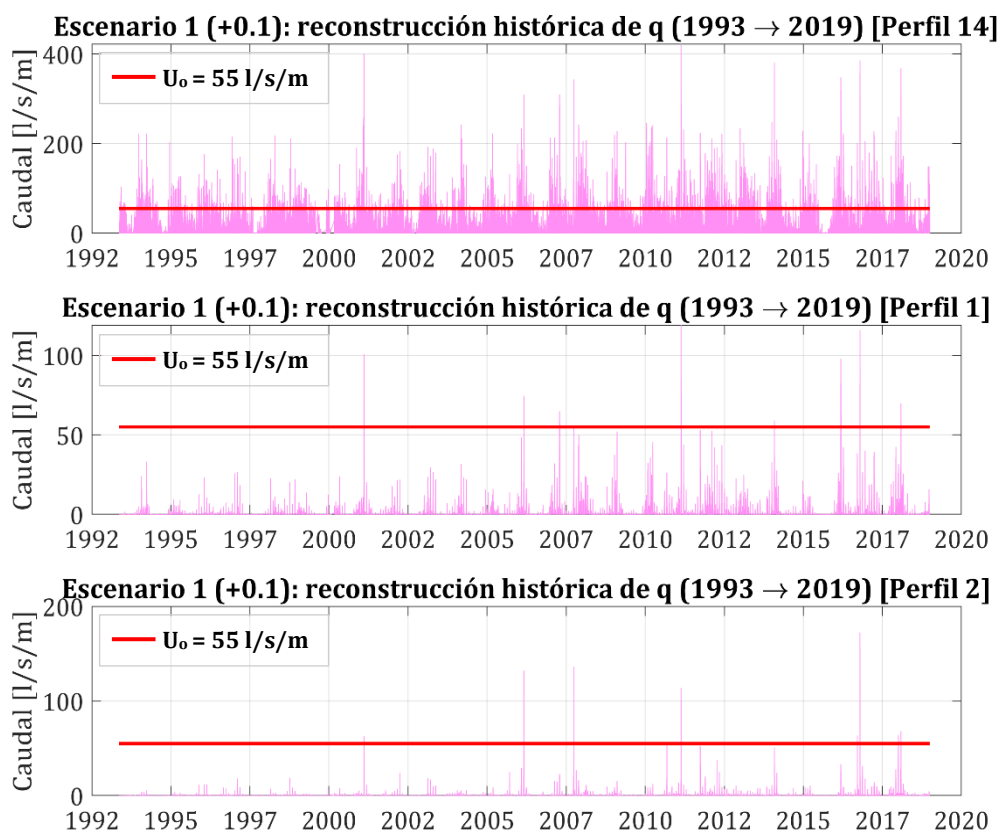


Figura 45. Escenario 1. Aumento del nivel del mar 0.10 m.

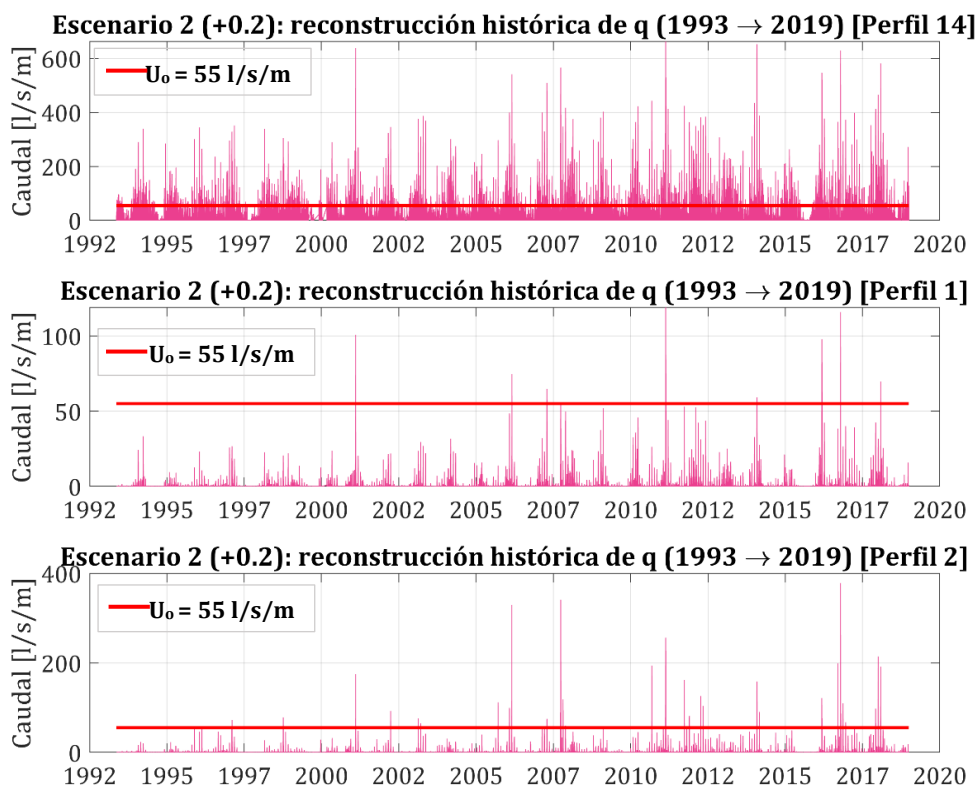


Figura 46. Escenario 2. Aumento del nivel del mar 0.20 m.

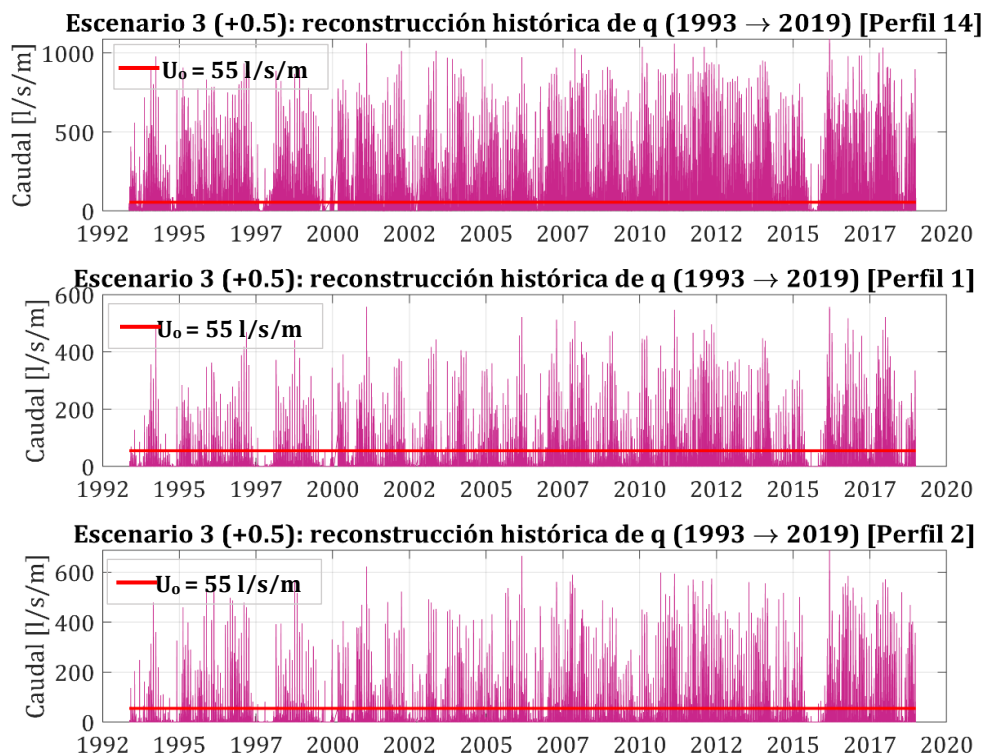


Figura 47. Escenario 3. Aumento del nivel del mar 0.50 m

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se proponen una serie de sugerencias como posibles futuras líneas de investigación en caso de que se desee indagar más a fondo en la materia. Primero se plantean dos propuestas dirigidas a mejorar el trabajo aquí presentado, dado que se ha realizado bajo una serie de hipótesis y limitaciones; y, más adelante, una serie de propuestas con carácter general:

- Una de las características fundamentales en el desarrollo de este trabajo ha sido el estudio de los perfiles con arrecifes de coral. Por lo que un parámetro importante a establecer ha sido el de la fricción del fondo marino. Aquí se asume un parámetro estándar y constante a lo largo del perfil por motivos de falta de información. Por tanto, la primera línea de investigación sería realizar una campaña o un estudio para profundizar en conocer las características de los arrecifes de coral y poder determinar así la fricción que supone el mismo para cada tramo de la sección transversal del perfil de forma más precisa.
- Mejorar la resolución del Modelo Digital del Terreno (MDT) supondría también mejorar la calidad de los resultados obtenidos. En este trabajo no se disponía información acerca de la cota de coronación de las infraestructuras de defensa que existen a lo largo de la región de Majuro, protegiendo la zona del aeropuerto, entre otras. Por tanto, sería de gran utilidad conocer la cota *real* de la que dispone el perfil de playa para poder realizar una estimación de la tasa instantánea de rebase con una mayor precisión.

- **Aplicar la metodología expuesta en otras regiones, a partir de distintas parametrizaciones de perfiles coralinos.** Si bien la metodología que se desarrolla en este trabajo se centra exclusivamente en el Atolón de Majuro, cabe la posibilidad de aplicarse para otras regiones con parametrizaciones de arrecife diferentes. Dejando abierta la posibilidad de establecer características similares entre perfiles situados en distintas localizaciones, ahorrando tiempo y esfuerzo computacional.
- **Aplicación y validación del metamodelo híbrido.** En este trabajo no se ha realizado una validación con datos reales a causa de la falta de información al respecto. Se han utilizado datos históricos recogidos en el artículo de [Ford et al., 2018], pero se plantea como futura línea de investigación aplicar el metamodelo híbrido para una localización de la que se dispongan datos de run-up y caudal de rebase para poder realizar una validación adecuada.

CONCLUSIONES

Tras la realización de esta tesis, donde se plantea una posible metodología para la evaluación de la operatividad en el aeropuerto de Majuro por inundación costera, se han deducido las conclusiones que se exponen a continuación.

En primer lugar, en lo que respecta al análisis de sensibilidad del modelo SWASH 1D, se ha comprobado que, para los casos estudiados, al aumentar el nivel del mar, se produce una rotura del oleaje más progresiva, una disminución del coeficiente de reflexión en el perfil, un aumento significativo del nivel de run-up. Además, al pasar de nivel del mar de -1.5 m a 0 m, se experimenta un incremento de 1 m en el parámetro de $Ru2\%$ y la tasa instantánea de rebase aumenta considerablemente como consecuencia directa del aumento del nivel del mar; Al aumentar la velocidad del viento, se produce un aumento de altura de ola de 10 cm y un aumento de $Ru2\%$ en la misma medida; Al aumentar la altura de ola significativa, se produce un aumento de la energía del oleaje entre un 30 % y un 50 % en función del tipo de perfil analizado y un aumento del run-up en torno a 0.80 m y, por tanto, se experimenta un aumento significativo de la tasa instantánea de rebase. Además, la rotura del oleaje se produce unos metros antes (50 m aprox.) sobre el perfil que aquellas olas con menor altura y la disipación de energía durante el proceso de rotura varía significativamente en función de la batimetría. También se ha comprobado que el perfil se vuelva cada vez menos reflejante para perfiles con plataforma coralina de más de 200 m de anchura; Por último, al aumentar el periodo pico, se produce un aumento significativo de la altura de ola, alrededor de 0.50 m para los tres perfiles analizados y, por tanto, de la energía del oleaje. Además de una subida del nivel de run-up de aproximadamente +50 cm, al aumentar 10 s el periodo.

En segundo lugar, se ha comprobado la idoneidad del modelo hidrodinámico SWASH 1D para el desarrollo de este tipo de trabajos. Los resultados obtenidos gracias a la aplicación del modelo resultan bastante coherentes con lo que sucedería *en teoría*. En un principio, se conocía que Majuro es una región altamente vulnerable frente a eventos de inundación [Ford et al., 2018] y, tanto las series reconstruidas de caudal instantáneo de rebase como las de run-up, obtenidas a partir del modelo numérico de propagación y la interpolación RBF, lo han confirmado.

Finalmente, en vista de los resultados obtenidos como objeto final en este trabajo, se ha podido afirmar que los perfiles que disponen de una plataforma coralina de mayor anchura son aquellos

que disipan una mayor cantidad de energía y, por tanto, son los menos vulnerables frente a eventos de inundación.

REFERENCIAS

- Ford, M., Merrifield, M. A., Becker, J. M., & Ford, M. (2018). Inundation of a low - lying urban atoll island: Majuro, Marshall Islands. *Natural Hazards*.
<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3183-5>
- Revision of World Population Prospects (2019). United Nations: Department of Economic and Social Affairs Population. Lugar de publicación: World Population Review: Marshall Islands Population 2020.
(<https://worldpopulationreview.com/countries/marshall-islands-population>)
- Central Intelligence Agency (CIA). Australia – Oceania: Marshall Islands. Lugar de publicación: The World Factbook. (https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/print_rm.html)
- Majuro (2015-12-06). Mega construcciones. Lugar de publicación: Mega construcciones.net. (<https://megaconstrucciones.net/?construccion=majuro>)
- Alba Ricondo Cueva (2018). *Desarrollo de un hindcast híbrido de oleaje espectral para el atolón de Majuro (República de las Islas Marshall)* (Trabajo de Fin de Máster). Universidad de Cantabria, Cantabria, Santander.
- Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Co, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Cheriton OM, Storlazzi CD, Rosenberger KJ (2016) Observations of wave transformation over a fringing coral reef and the importance of low-frequency waves and offshore water levels to runup, overwash, and coastal flooding. *J Geophys Res Oceans*, 121.
<https://doi.org/10.1002/2015JC011231>
- Ron K. Hoeke, Kathleen L. McInnes, Jens C. Kruger, Rebecca J. McNaught, John R. Hunter and Scott G. Smithers (2012). Widespread inundation of Pacific islands triggered by distant-source wind-waves.
- H. Holthuijsen, Leo, (2007), *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.